

工學博士 學位論文

鉛直柱狀構造物에 作用하는 非線形波力과  
構造物에 의한 非線形波浪變形 및 地形變動의 解析

**Analysis of Nonlinear Wave Force Acting on Vertical Columns,  
Nonlinear Wave Transformation and Seabed Deformation  
around a Cylindrical Structure**

指導教授 金 度 三

2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

申 東 勳

**Analysis of Nonlinear Wave Force Acting on Vertical Columns,  
Nonlinear Wave Transformation and Seabed Deformation  
around a Cylindrical Structure**

**by**

**Dong-Hoon Shin**

**Department of Civil and Environmental Engineering  
Graduate School  
Korea Maritime University**

**ABSTRACT**

Recently, the necessity of offshore and coastal area development became a national issue because of their importance in energy and national security. In particular, the supplies of petroleum, minerals and food are tied to the securing of national power source. Oil stockpile facilities and VLCC platforms in coastal area serve as the supply facilities for national power source, and port facilities like container terminals play a core part in physical distribution of materials connecting offshore to onshore areas. In designing the coastal and offshore structures, ocean wave is one of the most important factors to be considered to ensure the structural stability and the workability. Therefore, wave pressure and wave force should be precisely estimated in consideration of diffraction waves created by large vertical columns.

In this study we examined the nonlinear wave forces acting on structures of large vertical columns and the nonlinear wave transformation caused by the structures. Nonlinear frequency domain method, which is based on the perturbation and boundary integral

element methods, was applied to second order Stokes waves to analyze the nonlinear behaviors. By employing three-dimensional VOF (Volume of Fluid) method based on Navier-Stokes equation, complex behaviors of free surface caused by nonlinear interactions between wave and structure can be analyzed. We investigated the two nonlinear behaviors, the nonlinear wave forces acting on the vertical column and nonlinear wave transformations produced by the columns, in the case of non-breaking and breaking waves.

Sanada(1998) derived numerical solutions and analytical solutions of velocity potential for second order diffraction wave. The results of this study were compared with Sanada's(1998) numerical solutions and other experimental results to test the validity of the numerical analysis. Also, the results of the present numerical analysis for the wave forces acting on vertical columns are compared with Chakrabarti and Tam's(1975) experimental results. The results show excellent agreement between 3D-VOF methods and Sanada(1988)/Charkrabarti and Tam's(1975) experimental results.

Each numerical analysis in this study uses two vertical columns with arbitrary cross sections, and the characteristics of nonlinear wave force and nonlinear wave transformation are discussed for each type of cross section, their interval space, incident wave angle.

By using the 3-Dimensional VOF method, we investigated nonlinear wave force on structure wave height change, variation of wave breaking point, of the structure at a certain depth.

As the next step, for the purpose of explaining seabed deformation by wave induced current around vertical cylinder, analysis of seabed deformation around a circular cylinder is conducted by comparing with Toe's(1985) experimental results and using the results obtained by 3D-VOF method such as maximum velocity vector, mean velocity vector and wave height distribution. We performed numerical simulations using the Saito's formula(1988) applied the wave velocity of boundary layer calculated by 3D-VOF, to estimate seabed deformation focusing on the transformation by submerged vertical cylinder and vertical cylinder in case of non-breaking/breaking wave. The results of estimation are compared with Toe's(1985) experimental result.

The results of our study lead to the following conclusions :

***(1)Analysis of Nonlinear Wave Forces Acting on Vertical Columns and Consequent Nonlinear Wave Transformations around Vertical Columns under the Wave Field of Nonbreaking***

1) Analysis of wave transformation resulted in high rising of water level in front of vertical columns with circular and square cross section, and low rising of water level at rear side of the structure. Phase difference occurred in the time variation of the rising of water surface at the front and rear side of the structure affected by structure-structure interaction

2) The non-dimensional wave heights around vertical columns along the interval of dual vertical columns with different cross sections were complicated due to the effect of diffraction waves and nonlinear interactions.

3) For the wave forces acting on dual vertical columns with different cross sections along the interval of vertical columns, the variations of wave forces in x- and y-directions approach to those of one vertical column as the interval of vertical columns exceed a certain value.

***(2)Analysis of Non-Linear Wave Forces Acting on Vertical Columns and Consequent Nonlinear Wave Transformations around Vertical Columns under the Wave Field Post Breaking***

1) Free surface transformation in wave breaking is produced depending on the existence of vertical cylinder. free surface transformation is more vigorously affected by the diffraction wave as the depth of water increases.



2) When the wave breaking initiation point is created at the slope zone, the inclination of nonlinear wave forces acting on the structure placed at a given depth zone is bigger than that of the wave breaking in constant depth zone behind the end of slope zone. Thus in some parts of constant zone the wave forces acting on the structure are smaller even though the wave height is increased.

3) Variation in wave forces on structure along the wave breaking point is studied as the depth of a given depth zone changes, and no significant difference in results are found.

4) The inclination of wave forces at the wave breaking point is increased as the point gets closer to the vertical cylinder and decreased as being further.

### ***(3) Analysis of The Relation Between Seabed Deformation around a Large Cylindrical Structure and Wave Induced Current***

1) The relationship between scour and deposition was investigated comparing the existing experimental result and the maximum velocity at the bottom, mean velocity and distribution of wave height calculated by VOF method(3D-VOF). The maximum scour was shown at the area where maximum velocity was produced along the x-axis in front of the structure. Deposition was shown where the wave velocity was decreased, scour was shown at the area where the wave velocity was increased again.

2) Comparing to the wave height distribution, scour and deposition were occurred in the nodal and anti-nodal points of standing wave.

3) The numerical simulation of seabed deformation using Saito's(1988) formula applied the wave velocity of boundary layer calculated by 3D-VOF, in the case of non-breaking and breaking waves. The results of scour/deposition pattern are compared with Toe's(1985) experimental result, scour/deposition pattern of seabed in front of structure agreement between Toe's experimental results and numerical simulation of seabed deformation by 3D-VOF.

keywords : Navier-Stokes equation, 3D-VOF, Full-nonlinear analysis method, Diffraction wave, Nonlinear wave force, Nonlinear wave transformation, Wave breaking, Seabed deformation(scour/deposition), Vertical columns

# 鉛直柱狀構造物에 作用하는 非線形波力과 構造物에 의한 非線形波浪變形 및 地形變動의 解析

申 東 勳

韓國海洋大學校 大學院  
土木環境工學科

## 요 약

최근 해양과 해안의 개발의 필요성은 국가적인 문제로 인식되고 있다. 해양개발은 에너지자원의 개발뿐만 아니라 국가안보의 차원에서 점점 그 중요성이 강조되고 있으며, 특히 석유와 해저광물자원의 확보 및 식량자원의 확보는 국가에너지의 동력원 확보라는 중요한 문제와 연결되어 있다. 해안역에 설치되는 석유비축기지, 원유접안시설은 국가에너지의 공급원으로서, 컨테이너부두와 같은 항만시설은 내륙과 해양을 연결하는 물류의 중심으로서 기능을 수행하고 있다. 이러한 해안 및 해양구조물의 설계에 있어서 가장 중요한 외력의 요소 중의 하나인 파랑의 영향을 충분히 고려하여 구조물의 안정성과 작업가능성을 검토하여야 한다. 따라서, 대형연직주상구조물에 의해 발생하는 회절파를 고려한 작용파압 및 파력은 내파설계상 정확히 예측될 필요가 있다.

먼저, 본 연구에서는 복수의 대형연직주상구조물을 중심으로 구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형을 검토하며, 수치해석의 이론으로 1)Stokes 2차파의 경우에 대한 섭동전개법과 경계적분법에 기초한 비선형주파수영역해석법을 적

용하여 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력 및 구조물에 의한 비선형파랑변형을 해석하고, 2)파랑과 구조물과의 비선형상호간섭에 따른 복잡한 자유수면의 거동특성을 고 정도로 해석할 수 있는 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 자유수면추적에 3차원 VOF (Volume Of Fluid)법(Full-nonlinear해석법)을 적용하여 쇄파 및 쇄파후의 파랑에 의한 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력 및 구조물에 의한 비선형파랑변형을 해석한다.

이상의 수치해석 이론으로부터 얻어지는 수치해의 타당성을 검증하기 위해 연직원주구조물과 파랑과의 비선형간섭에 있어서 해석해 및 2차오더의 회절산란포텐셜을유도한 Sanada(1998)의 수치해석결과와 수리실험결과를 중심으로 한 기존의 해석결과와본 수치해석결과를 비교·검토하였고, 연직원주구조물에 작용하는 파력특성에 대하여 Chakrabarti and Tam(1975)의 수리실험결과와 본 연구의 수치해석결과를 비교·검토하였다. 각각의 수치해석에 2기로 구성된 임의형상의 연직주상구조물을 적용하며, 구조물의 형상, 구조물의 배치간격, 입사파향각의 변화에 따른 비선형파력과 비선형파랑변형의 특성을 논의하였다. 그리고, Navier-Stokes의 운동방정식과 VOF법을 적용하여 경사면을 지나 일정수심역에 위치한 연직주상구조물에 대하여 파고변화 및 구조물 위치변화에 따른 쇄파후에 비선형파력의 변화특성을 검토하였다.

다음으로, 구조물의 주변에서 파동에 의한 세굴과 퇴적현상과 같은 지형변동을 규명하기 위해 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF법(Full-nonlinear해석법)으로부터 산정되는 저면에서의 최대유속벡터와 평균유속벡터 및 파고분포와 같은 파동장의 특성을 이용하여 원주구조물의 저면에서 발생하는 세굴과 퇴적현상에 대한 기존의 수리실험결과와 연계하여 파동장의 특성이 저면의 지형변화에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, Saito(1988)의 토사이동식에 본 해석법에 의해 산정된 유속을 적용하여 토사이동에 관한 수치시뮬레이션을 수행하여 토사이동을 해석하였으며, 특히 쇄파시에 수중연직주상구조물에 의한 지형변동을 해석하고 Toe(1985)의 수리실험결과와 비교하였다.

이상의 과정으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

### **(1)비쇄파시에 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형**

1)원형단면 및 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물에 있어서 구조물의 전면에서는 부분중복파의 영향으로 높은 수면상승고를, 구조물의 배후면에서는 상대적으로 낮은 수면상승고를 나타내었다. 또한, 구조물 전면과 배후면에서의 수면상승고의 시간변화에 위상차이를 보이며, 특히 구조물 배후면에서의 수면상승고에 대한 시간변화는 구조물간의 간섭현상 및 회절산란파의 영향으로 비선형성이 크게 나타났다.

2)복수연직주상구조물에서 배치간격의 변화에 따른 구조물의 표면둘레에서 최대수면상승고는 구조물에 의한 회절산란파의 영향과 구조물간의 비선형간섭으로 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3)구조물의 배치간격에 따른 복수연직주상구조물에 작용하는 각 성분파력의 변화는 구조물의 배치간격이 일정거리 이상으로 되면 단수연직주상구조물의 각 성분파력에 근접하게 되는 것을 알 수 있었다.

### **(2)쇄파후에 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형**

1)구조물의 유무에 따라 쇄파파형에 변화가 발생하며, 일정수심역의 수심이 깊을수록 구조물에 의한 반사파의 영향이 더 커지고, 더불어 쇄파파형에서 변화도 크게 나타났다.

2)쇄파발생지점이 경사면에서 발생하면 일정수심역에 위치한 구조물에 작용하는 비선형파력의 감소기울기가 사면분기점후에 쇄파파형이 발생하는 경우보다 크고, 따라서 일부영역에서는 파고가 증가하여도 구조물에 작용하는 파력이 작게 나타났다.

3)쇄파발생위치에 따른 파력변화특성을 일정수심역의 수심을 변화시키면서 고찰하였고, 2)와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

4) 쇄파발생지점에 구조물이 근접할수록 파력의 변화기울기는 급격하게 증가하고, 멀어짐에 따라 파력의 변화기울기가 완만해지는 결과를 얻었다.

### **(3)연직주상구조물의 주변에서 흐름과 지형변동**

1)기존의 실험결과와 본 해석법에 의해 산정된 저면최대유속, 평균유속 및 파고분포와 비교하여 세굴과 퇴적과의 연관성을 검토하였다. 구조물의 전면에서 -x축방향으로 최대유속이 발생하는 영역에서 최대세굴심이 나타나고, 유속이 감소하는 영역에서는 퇴적이 나타나며, 다시 유속이 증가하는 영역에서 세굴이 나타났다.

2)파고분포와 비교하였을 때 중북파의 Node부분에서는 세굴이, Anti-node에서는 퇴적이 일어났다.

3)본 해석법에 의해 산정된 저면유속을 기존의 토사이동식에 적용하여 쇄파 및 비쇄파시의 경우에 (수중)원주구조물의 주변에서 지형변동에 관한 수치시뮬레이션을 수행하였고, 기존의 실험결과와 세굴 및 퇴적의 경향이 대체로 잘 상응하였다.

핵심용어 : 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식, 3차원 VOF법, Full-nonlinear해석법, 회절파, 비선형파력, 비선형파랑변형, 쇄파, 지형변동(세굴, 퇴적), 연직주상구조물

# 목 차

ABSTRACT .....	i
요약 .....	vi
목차 .....	x
LIST OF TABLES .....	xv
LIST OF PHOTOS .....	xvi
LIST OF FIGURES .....	xvii

## 제 1장 서론 1

1. 연구의 배경 .....	1
2. 기존의 연구 .....	6
2.1 비선형파동장의 해석 .....	6
2.2 파동장에서 지형변동의 해석 .....	8
3. 연구의 목적과 구성 .....	9
<참고문헌> .....	11

## 제 2장 Stokes의 2차파이론에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석 16

1. 개요 .....	16
2. 수치해석이론 .....	16
2.1 지배방정식과 자유수면경계조건 .....	16
2.2 섭동전개와 복합수면경계조건 .....	17

2.2.1	섭동전개	17
2.2.2	복합수면경계조건	18
2.2.3	First order	19
2.2.4	Second order	21
2.2.5	Green 공식과 $\varphi(x, y)$	24
2.2.6	이산화	26
2.2.7	수면파형	30
2.2.8	파력	30
<b>3.</b>	<b>수치해석결과</b>	<b>32</b>
3.1	수치해석결과의 검증	32
3.2	수치해석결과	35
3.2.1	비선형파랑변형	35
3.2.2	비선형파력	51
<b>4.</b>	<b>결론</b>	<b>54</b>
	<참고문헌>	55

## **제 3장 비쇄파시 Full-nonlinear해석법에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석** **57**

<b>1.</b>	<b>개요</b>	<b>57</b>
<b>2.</b>	<b>수치해석이론</b>	<b>58</b>
2.1	수치파동수로	58
2.1.1	기초방정식	59
2.1.2	엇갈린격자	60



2.1.3 기초방정식의 이산화 .....	61
2.1.4 Two-step projection method .....	63
2.2 VOF법에 의한 자유수면의 추적 .....	69
2.2.1 이류방정식 .....	69
2.2.2 이류방정식의 이산화 .....	70
2.2.3 자유수면의 모델링 .....	70
2.2.4 자유수면의 판정 .....	70
2.2.5 수치계산 .....	74
2.3 경계조건 .....	80
2.3.1 자유수면에서의 경계조건 .....	80
2.3.2 개경계조건 .....	81
2.3.3 조파조건 .....	82
2.3.4 안정조건 .....	85
2.3.5 그 외의 경계조건 .....	86
2.4 수치계산의 흐름 .....	86
<b>3. 수치해석결과의 검증 .....</b>	<b>88</b>
3.1 조파파형 .....	88
3.2 파랑변형 .....	89
3.3 파력 .....	93
<b>4. 수치해석결과 .....</b>	<b>95</b>
4.1 단수연직주상구조물 .....	95
4.2 원형단면의 복수연직주상구조물 .....	100
4.2.1 입사파향각 $\alpha = 0^\circ$ .....	101
4.2.2 입사파향각 $\alpha = 45^\circ$ .....	110
4.2.3 입사파향각 $\alpha = 90^\circ$ .....	115
4.3 정사각형단면의 복수연직주상구조물 .....	119

4.3.1 입사파향각 $\alpha = 0^\circ$ .....	120
4.3.2 입사파향각 $\alpha = 45^\circ$ .....	125
4.3.3 입사파향각 $\alpha = 90^\circ$ .....	131
<b>5. 결론</b> .....	136
<참고문헌> .....	139

## 제 4장 소재후 Full-nonlinear해석법에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석 141

<b>1. 개요</b> .....	141
<b>2. 수치해석</b> .....	142
2.1 구조물 및 해저의 조건 .....	142
2.2 수치해석결과( $d=4\text{cm}$ ) .....	144
2.2.1 파고변화에 따른 비선형파력의 특성 .....	144
2.2.2 파고변화에 따른 비선형파랑변형의 특성 .....	146
2.2.3 구조물의 위치변화에 따른 비선형파력의 특성 .....	157
2.3 수치해석결과( $d=6\text{cm}$ ) .....	158
2.3.1 파고변화에 따른 비선형파력과 비선형파랑변형의 특성 .....	158
2.3.2 구조물의 위치변화에 따른 비선형파력의 특성 .....	167
2.3.3 3차원표면파형의 변화 .....	170
<b>3. 결론</b> .....	178
<참고문헌> .....	179

## 제 5장 구조물의 주변에서의 흐름과 지형변동의 해석 180

1. 개요 .....	180
2. 직립벽의 전면에서 세굴과 퇴적 .....	182
3. 연직주상구조물(원형단면)의 주변에서 지형변동의 해석 .....	184
3.1 수리실험 및 수치해석의 조건 .....	184
3.2. 파랑특성이 지형변동에 미치는 영향 .....	185
3.2.1 Model-I .....	185
3.2.2 Model-II .....	193
4. 지형변동의 수치시뮬레이션 .....	200
4.1 토사이동식 .....	200
4.2 저면지형변동의 평형상태 .....	202
4.3 수치시뮬레이션의 결과 .....	203
4.4 토사이동식의 한계성 및 적용성 .....	207
5. 결론 .....	208
<참고문헌> .....	209

## 제 6장 종합결론 212

# LIST OF TABLES

Table 3.1 Determination of the free surface orientation. ....	73
Table 3.2 Conditions of numerical analysis for single vertical column. ....	95
Table 3.3 Conditions of numerical analysis for circular column. ....	100
Table 3.4 Conditions of numerical analysis for square column. ....	119
Table 4.1 Conditions of numerical analysis for circular column ....	142
Table 4.2 Summary of wave breaking point and duration time in case of $H=9\text{cm}$ and $10\text{cm}$ . .....	147
Table 4.3 Summary of wave breaking point and duration time in case of $H=11\text{cm}$ and $12\text{cm}$ . .....	159
Table 5.1 Experimental conditions(Toe's, 1985). ....	185

# LIST OF PHOTOS

Photo. 1.1 A Fixed offShore jacket platform structure, Vietnam 11-2 site gas platform, Korea National Oil Corporation, 2006 .....	3
Photo. 1.2 Large cylindrical offShore structure. ....	4
(a) Exxon Neftegas Ltd Gravity Based Structure(GBS) 'Orlan', Sakhalin-1, Russia,2005	
(b) Hibernia Gravity Based production Structure(GBS) 'Offshore Newfoundland', Canada,1997	
(c) A Deep Draft Semi-Submersible platform(DDSS)	
(d) Red Hawk cell spar, Gulf of Mexico, USA, 2004	
Photo. 1.3 BukHang Bridge located in Busan north port. ....	4
Photo 1.4 Damage to onshore & offshore Structure. ....	5
(a) Thunder Horse, a semi-submersible platform owned by BP, the rig was evacuated for Hurricane Dennis. U.S. Coast Guard photograph, 2005	
(b) Storm damages tanks and displaced by flooding.	

# LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Definition sketch. ....	17
(a) Plan view, (b) Side view	
Fig. 2.2 Special point in open field and integral boundary. ....	25
Fig. 2.3 Nodal points in numerical analysis. ....	26
Fig. 2.4 Wave maximum runup and minimum rundown envelopes around circular cylinder	
$(k^{(1)}h=1.4, k^{(1)}H=0.305, a/h=0.463, \alpha=0^\circ)$ . ....	33
Fig. 2.5 Wave maximum runup and minimum rundown envelopes along x and y axes	
$(k^{(1)}h=1.0, k^{(1)}H=0.162, a/h=0.463, \alpha=0^\circ)$ . ....	34
Fig. 2.6 Wave wave forces acting on a circular column ( $h/a=5.0, H/a=0.25$ ). ....	34
Fig. 2.7 Wave runup envelopes around a vertical circular column ( $k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0$ ). ....	37
(a) $\Pi=0.06$ , (b) $\Pi=0.03$	
Fig. 2.8 Contours of the maximum rising water level near a vertical circular column	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ . ....	38
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.9 Oblique view of the maximum rising water level near a vertical circular column	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ . ....	38
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.10 Contours of the maximum rising water level near a vertical square column	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ . ....	39
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.11 Oblique view of the maximum rising water level near a vertical square column	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ . ....	39
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.12 Contours of the maximum rising water level near a vertical rectangular column	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ . ....	40
(a) Linear theory, (b) Second order theory	

Fig. 2.13 Oblique view of the maximum rising water level near a vertical rectangular column	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ . ....	40
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.14 Calculating condition of two vertical columns. ....	41
(a) Two circular columns, (b) Two rectangular columns	
Fig. 2.15 Maximum Wave runup envelopes around two vertical circular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.03, \alpha=0^\circ)$ . ....	45
(a) No. 1 cylinder( $e/D=1.0$ ), (b) No. 1 cylinder( $e/D=2.0$ )	
(c) No. 2 cylinder( $e/D=1.0$ ), (d) No. 2 cylinder( $e/D=2.0$ )	
Fig. 2.16 Maximum Wave runup envelopes around two vertical circular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.03, \alpha=90^\circ)$ . ....	46
(a) No. 1 cylinder( $e/D=1.0$ ), (b) No. 1 cylinder( $e/D=2.0$ )	
(c) No. 2 cylinder( $e/D=1.0$ ), (d) No. 2 cylinder( $e/D=2.0$ )	
Fig. 2.17 Contours of the maximum rising water level near two vertical circular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ)$ . ....	47
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.18 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical circular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ)$ . ....	47
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.19 Contours of the maximum rising water level near two vertical circular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=90^\circ)$ . ....	48
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.20 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical circular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=90^\circ)$ . ....	48
(a) Linear theory, (b) Second-order theory	
Fig. 2.21 Contours of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns	
$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ)$ . ....	49
(a) Linear theory, (b) Second order theory	

Fig. 2.22 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns ( $k^{(1)}h=2.0$ , $h/a=1.0$ , $\Pi=0.06$ , $e/D=1.0$ , $\alpha=0^\circ$ ). .....	49
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.23 Contours of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns ( $k^{(1)}h=2.0$ , $h/a=1.0$ , $\Pi=0.06$ , $e/D=1.0$ , $\alpha=90^\circ$ ). .....	50
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.24 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns ( $k^{(1)}h=2.0$ , $h/a=1.0$ , $\Pi=0.06$ , $e/D=1.0$ , $\alpha=90^\circ$ ). .....	50
(a) Linear theory, (b) Second order theory	
Fig. 2.25 Maximum wave force acting on two vertical circular columns ( $a/h=0.862$ , $H/h=0.2$ , $e/D=1.0$ ). .....	52
(a) $\alpha=0^\circ$ , (b) $\alpha=90^\circ$	
Fig. 2.26 Maximum wave force acting on two vertical square columns ( $a/h=0.862$ , $H/h=0.2$ , $e/D=1.0$ ). .....	52
(a) $\alpha=0^\circ$ , (b) $\alpha=90^\circ$	
Fig. 2.27 Maximum wave force acting on two vertical rectangular columns ( $a/h=0.862$ , $H/h=0.2$ , $e/D=1.0$ ). .....	53
(a) $\alpha=0^\circ$ , (b) $\alpha=90^\circ$	
Fig. 3.1 Definition sketch of 3D numerical wave channel. ....	58
(a) Plan view, (b) Side view	
Fig. 3.2 Location of variables for a typical mesh cell. ....	60
Fig. 3.3 Comparison of numerical scheme for computational run time and convergence ( $H/L=0.02$ , $h/L=0.102$ ). ....	68
(a) This study, (b) HSMAC scheme	
Fig. 3.4 Modeling of free surface. ....	72
Fig. 3.5 Exception on the classification of cells. ....	72



Fig. 3.6 Evaluation of free surface shape. ....	72
Fig. 3.7 Definition of donor-cell and acceptor-cell. ....	75
Fig. 3.8 Fluid density of boundary cell for donor-acceptor method. ....	76
Fig. 3.9 Change of subscript in the boundary cell. ....	76
Fig. 3.10 Advection method of VOF function. ....	78
Fig. 3.11 Exception of advection computation. ....	78
Fig. 3.12 Horizontal velocity boundary condition. ....	80
Fig. 3.13 Vertical velocity boundary condition. ....	80
Fig. 3.14 Sketch of added fictitious dissipation zone. ....	82
Fig. 3.15 Variation of wave source factor. ....	84
Fig. 3.16 Flow chart of computational procedure. ....	87
Fig. 3.17 Spatial distribution of water level. ....	88
Fig. 3.18 Spatial distribution of computed and target wave profiles at each time. ....	89
Fig. 3.19 Definition sketch of 3D numerical wave channel for comparison of wave transformations. ....	91
(a) Plan view, (b) Side view	
Fig. 3.20 Comparison of spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ along x-axis( $H/L=0.02$ ). ....	91
(a) $y=0\text{cm}$ , (b) $y=25\text{cm}$	
Fig. 3.21 Comparison of spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ around vertical column( $H/L=0.02$ ). ....	92
Fig. 3.22 Comparison of spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ around vertical column( $H/L=0.0053$ ). ....	92
Fig. 3.23 Defiction sketch for comparison of wave forces acting on the vertical column. ....	93
Fig. 3.24 Comparison of non-dimensional maximum wave forces $F_{\max}/\rho g a^2(H/2)$ acting on the vertical column. ....	94
Fig. 3.25 Numerical model of vertical column. ....	95
(a) Circular column, (b) Square column	

Fig. 3.26 Distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ around vertical column. ....	97
(a) Circular column, (b) Square column	
Fig. 3.27 Distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ around vertical column. ....	98
(a) Circular column( $D/L=0.42$ ), (b) Square column( $D/B=0.42$ )	
Fig. 3.28 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ around vertical column( $H/L=0.042$ ). ....	99
(a) Circular column( $D/L=0.42$ ), (b) Square column( $D/B=0.42$ )	
Fig. 3.29 Numerical model of dual vertical columns with circular section. ....	100
Fig. 3.30 Variation of maximum wave force components acting on vertical column 1 with circular section. ....	102
(a) $x$ -directional wave force components,	
(b) $y$ -directional wave force components	
Fig. 3.31 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ for vertical column with circular section. ....	104
(a) $e/D=0.25$ , (b) $e/D=1.5$ , (c) $e/D=2.5$	
Fig. 3.32 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with circular section. ....	105
(a) $e/D=0.25$ , (b) $e/D=1.5$	
Fig. 3.33 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with circular section. ....	105
Fig. 3.34 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ around vertical column with circular section. ....	106
(a) $D/L=0.278$ , (b) $D/L=0.435$	
Fig. 3.35 Distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ along $y$ -axis. ( $D/L=0.278$ ) ....	108
(a) $e/D=1.0$ , (b) $e/D=3.0$	

Fig. 3.36 Distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ along y-axis. ( $D/L=0.435$ ) .....	109
(a) $e/D=1.0$ , (b) $e/D=3.0$	
Fig. 3.37 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column with circular section. ....	110
(a) Vertical column 1, (b) Vertical column 2	
Fig. 3.38 Variation of y-directional maximum wave forces acting on vertical column with circular section. ....	111
(a) Vertical column 1, (b) Vertical column 2	
Fig. 3.39 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ for vertical column with circular section. ....	113
(a) $e/D=1.0$ , (b) $e/D=1.75$	
Fig. 3.40 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with circular section. ....	114
(a) $e/D=1.0$ , (b) $e/D=1.75$	
Fig. 3.41 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with circular section. ....	114
Fig. 3.42 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column with circular section. ....	115
(a) Vertical column 1, (b) Vertical column 2	
Fig. 3.43 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ for vertical column with circular section. ....	117
(a) $e/D=1.75$ , (b) $e/D=2.5$	
Fig. 3.44 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with circular section. ....	118
(a) $e/D=1.75$ , (b) $e/D=2.5$	
Fig. 3.45 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with circular section. ....	118

Fig. 3.46 Numerical model of dual vertical columns with square section. ....	119
Fig. 3.47 Variation of maximum wave force components acting on vertical column 1 with square section. ....	121
(a) x-directional wave force components	
(b) y-directional wave force components	
Fig. 3.48 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ for vertical column with square section. ....	123
(a) $e/B=0.25$ , (b) $e/B=1.0$ , (c) $e/B=2.0$ , (d) $e/B=2.5$	
Fig. 3.49 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with square section. ....	124
(a) $e/B=1.0$ , (b) $e/B=2.0$	
Fig. 3.50 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with square section. ....	125
Fig. 3.51 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column with square section. ....	126
(a) Vertical column 1, (b) Vertical column 2	
Fig. 3.52 Variation of y-directional maximum wave forces acting on vertical column with square section. ....	127
(a) Vertical column 1, (b) Vertical column 2	
Fig. 3.53 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{\max}/H$ for vertical column with square section. ....	129
(a) $e/B=1.25$ , (b) $e/B=1.75$	
Fig. 3.54 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with square section. ....	130
(a) $e/B=1.25$ , (b) $e/B=1.75$	
Fig. 3.55 Time variation of x-directional wave forces acting on vertical column with square section. ....	130

Fig. 3.56 Time variation of y-directional wave forces acting on vertical column  
with square section. .... 131

Fig. 3.57 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical  
column with square section. .... 133

(a) Vertical column 1, (b) Vertical column 2

Fig. 3.58 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$  for vertical  
column with square section. .... 134

(a)  $e/B=2.0$ , (b)  $e/B=2.5$

Fig. 3.59 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column  
with square section. .... 135

(a)  $e/B=2.0$ , (b)  $e/B=2.5$

Fig. 3.60 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column  
with square section. .... 135

Fig. 4.1 Definition sketch of 3D numerical wave channel in case of installed circular column. .... 143

(a) Side view, (b) Plan view

Fig. 4.2 Definition sketch of 3D numerical wave channel in case of not installed circular column.  
..... 143

(a) Side view, (b) Plan view

Fig. 4.3 Definition sketch of Section A-A` in the 3D numerical wave channel in case of  
not installed circular column. .... 144

Fig. 4.4 Definition sketch of Section B-B` in the 3D numerical wave channel in case of  
installed circular column. .... 145

Fig. 4.5 The variation of non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular  
column according to the change of wave height( $d=4\text{cm}$ ). ....

.....

.....

.....	
.....	145
Fig. 4.6 The surf zone dived into the shoaling deformation zone, outer breaking zone, inner breaking zone, swash zone. ....	147
Fig. 4.7 Free surface evolution in case of not installed circular ( $t/T=9/40 \sim 15/40$ , $H=9.0\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ ). ....	149
Fig. 4.8 Free surface evolution in case of installed circular column ( $t/T=9/40 \sim 15/40$ , $H=9.0\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ ). ....	150
(a) not installed circular column, (b) installed circular column	
Fig. 4.9 Free surface evolution in limited region $x=450\text{cm} \sim 750\text{cm}$ ( $H=9.0\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ ). ....	151
(a) In case of not installed circular column ( $t/T=9/40 \sim 15/40$ ), (b) In case of installed circular column ( $t/T=9/40 \sim 15/40$ )	
Fig. 4.10 Free surface evolution in case of not installed circular column ( $t/T=5/40 \sim 11/40$ , $H=10.0\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ ). ....	152
Fig. 4.11 Free surface evolution in case of installed circular column. ( $t/T=5/40 \sim 12/40$ , $H=10.0\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ ). ....	153
Fig. 4.12 Free surface evolution in limited region $x=450\text{cm} \sim 750\text{cm}$ ( $H=10.0\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ ). ....	154
(a) In case of not installed circular column ( $t/T=5/40 \sim 11/40$ ), (b) In case of installed circular column ( $t/T=5/40 \sim 12/40$ )	
Fig. 4.13 Free surface evolution in case of not installed circular column. ....	155
(a) $H=9.0\text{cm}$ , $t/T=9/40 \sim 15/40$ , (b) $H=10.0\text{cm}$ , $t/T=5/40 \sim 11/40$	
Fig. 4.14 Free surface evolution in case of installed circular column. ....	156
(a) $H=9.0\text{cm}$ , $t/T=9/40 \sim 15/40$ , (b) $H=10.0\text{cm}$ , $t/T=5/40 \sim 11/40$	
Fig. 4.15 Non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular column according to the variation of installed position of structure ( $d=4\text{cm}$ ). ....	158
Fig. 4.16 The variation of non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular	

column according to the change of wave height( $d=6\text{cm}$ ). .....	159
Fig. 4.17 Free surface evolution in case of installed circular column	
( $t/T=8/40 \sim 13/40$ , $H=11.0\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ ). .....	161

Fig. 4.18 Free surface evolution in case of installed circular column ( $t/T=11/40 \sim 16/40$ , $H=11.0\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ ). .....	162
Fig. 4.19 Free surface evolution in region $x=450\text{cm} \sim 750\text{cm}$ ( $H=11.0\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ ). .....	163
(a) In case of not installed circular column ( $t/T=8/40 \sim 13/40$ ), (b) In case of installed circular column ( $t/T=11/40 \sim 16/40$ )	
Fig. 4.20 Free surface evolution in case of installed circular column ( $t/T=16/40 \sim 23/40$ , $H=12.0\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ ). .....	164
Fig. 4.21 Free surface evolution in case of installed circular column ( $t/T=16/40 \sim 23/40$ , $H=12.0\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ ). .....	165
Fig. 4.22 Free surface evolution in region $x=450\text{cm} \sim 750\text{cm}$ ( $H=12.0\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ ). .....	166
(a) In case of not installed circular column ( $t/T=16/40 \sim 23/40$ ), (b) In case of installed circular column ( $t/T=16/40 \sim 12/40$ )	
Fig. 4.23 Free surface evolution in case of not installed circular column. ....	167
(a) $H=11\text{cm}$ , $t/T=8/40 \sim 13/40$ , (b) $H=12\text{cm}$ , $t/T=16/40 \sim 23/40$	
Fig. 4.24 Free surface evolution in case of installed circular column. ....	168
(a) $H=11\text{cm}$ , $t/T=11/40 \sim 16/40$ , (b) $H=12\text{cm}$ , $t/T=16/40 \sim 23/40$	
Fig. 4.25 Non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular column according to the variation of installed position of structure( $d=6\text{cm}$ ). .....	169
Fig. 4.26 Surface plot of water surface profiles( $H=10\text{cm}$ , $d=4\text{cm}$ , $S=180\text{cm}$ ). .....	173
Fig. 4.27 Surface plot of water surface profiles( $H=11\text{cm}$ , $d=6\text{cm}$ , $S=30\text{cm}$ ). .....	177
Fig. 5.1 Scour pattern in front of vertical breakwater. ....	182
(a) In case of the fine sand, (b) In case of the coarse sand	
Fig. 5.2 Definition sketch of 3D numerical wave channel. ....	184
(a) Side view, (b) Plan view	



Fig. 5.3 Scour pattern around a vertical circular column	
(Model-I, $T=1.0s$ , $H=10cm$ ). .....	185
Fig. 5.4 Maximum velocity around a vertical circular cylinder	
(Model-I, $T=1.0s$ , $H=10cm$ ). .....	187
(a) Contour plot of maximum velocity, (b) Vector plot of maximum velocity	
Fig. 5.5 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{max}/H$	
for vertical circular cylinder. ....	188
(a) Contour plot of $2\eta_{max}/H$ , (b) 3D surface plot of $2\eta_{max}/H$	
Fig. 5.6 Mean velocity around a vertical circular cylinder. ....	189
(a) Contour Plot of mean velocity, (b) Vector Plot of mean velocity	
Fig. 5.7 Scour pattern around a vertical circular cylinder.	
(Model-I, $T=1.5s$ , $H=10cm$ ). .....	189
Fig. 5.8 Maximum velocity around a vertical circular cylinder	
(Model-I, $T=1.5s$ , $H=10cm$ ). .....	191
(a) Contour Plot of maximum velocity, (b) Vector Plot of maximum velocity	
Fig. 5.9 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels $2\eta_{max}/H$ around	
a vertical circular cylinder. ....	192
(a) Contour plot of $2\eta_{max}/H$ , (b) 3D surface plot of $2\eta_{max}/H$	
Fig. 5.10 Mean velocity around a vertical circular cylinder (Model-I, $T=1.5s$ , $H=10cm$ ). ....	192
(a) Contour Plot of mean velocity, (b) Vector Plot of mean velocity	
Fig. 5.11 Scour pattern around a vertical circular cylinder (Model-II, $T=1.5s$ , $H=10cm$ ). ....	193
Fig. 5.12 Wave breaking in submerged vertical circular cylinder	
(Model-II, $T=1.5s$ , $H=10cm$ , $SH=16cm$ ). ....	194
(a) Definition sketch of section A-A', (b) Section A-A'	
Fig. 5.13 Surface plot of water surface profiles (Model-II, $T=1.5s$ , $H=10cm$ , $SH=26cm$ ). ....	198
Fig. 5.14 Maximum velocity around a submerged vertical circular cylinder	
(Model-II, $T=1.5s$ , $H=10cm$ , $SH=16cm$ ). ....	199
(a) Contour plot of maximum velocity, (b) Vector plot of maximum velocity	

Fig. 5.15 Mean velocity around a submerged vertical circular cylinder ( <i>Model-II</i> , $T=1.5s$ , $H=10cm$ , $SH=16cm$ ). .....	199
(a)Contour plot of mean velocity, (b)Vector plot of mean velocity	
Fig. 5.16 Scour pattern around a circular cylinder.....	205
(a) <i>Model-I</i> , $T=1.0s$ , $H=10cm$ , (b) <i>Model-I</i> , $T=1.5s$ , $H=10cm$	
(c) <i>Model-II</i> , $T=1.5s$ , $H=10cm$ , $SH=16cm$ (submerged circular cylinder)	
Fig. 5.17 Surface plot of seabed deformation by local scour( <i>Model-I</i> , $H=10cm$ ) .....	206

---

# 1장 서론

---

## 1. 연구의 배경

지금 세계는 해안과 해양의 개발을 새로운 관점으로 바라보고 있다. 새로운 시각의 변화는 무분별한 개발에서 자연과의 조화로, 비용문제 중심의 자원개발에서 에너지의 확보와 해양에서의 우선적 권리행사로 관점이 변화되고 있다. 먼저, 자연과 환경의 문제는 이제 개발에 있어 무엇보다도 중요한 문제가 되었으며, 보전과 개발이라는 양립적인 개념에서 상호보완적인 방향으로 나아가고 있다. 특히, 해안역의 개발로 인한 환경 변화의 영향은 단기간에 직접적으로 변화를 느낄 수 있을 정도로 그 변화의 정도가 크다. 따라서, 해안역의 개발에 있어서 파랑환경의 변화로 인한 주변환경의 영향과 해안역에 설치되는 구조물(예로, 방파제, 잠제, 호안 등)에 의한 파랑변화 및 구조물에 작용하는 파력은 고정도로 해석될 필요가 있으며, 이러한 해석기술은 해안역의 개발에 가장 중요한 요소이다. 다음으로, 해양개발에 있어서도 과거에는 개발의 관심사가 해양에 비해 육상에 대부분 한정되었지만, 이제 에너지자원의 문제, 해양자원의 중요성, 해양에서 자국의 권익선점, 육상공간의 부족 등의 이유로 점점 해안뿐만 아니라 해양으로 개발의 범위를 확대하고 있다. 지금, 우리는 해양의 시대로 나아가고 있으며, 해안개발 및 해양개발의 목적이 생활환경의 확대, 농지확장 등으로 해안의 근처를 매립하여 매립공간의 활용이라는 국지적인 관점에서 벗어나 국가의 이익을 동반하는 다변화되는 목적으로 변화되어 가고 있다.

이제 해안과 해양을 개발하는 것은 국가적인 문제로 대두되었다. 최근의 고유가로 인하여 북극해, 아프리카의 인근해, 대서양 및 태평양의 심해저에서 유전개발 등에 생산비용의 문제와 기술적인 한계, 작업환경의 여건 등과 같은 여러 가지 문제로 기피하여 왔지만, 이제 누가 먼저 선점하느냐가 중요하다는 인식에서 비용문제를 떠나 국가적 에너지의 확보차원에서 접근하고 있다. 그러나, 이러한 해안개발 및 해양개발에서 가장 큰 문제점 중의 하나는 예상치 못하는 자연환경을 극복해야 한다는 것이다. 파랑, 바람,

강우 등 자연환경조건을 고려하는 경우에 일반적으로 과거의 조건을 이용하지만, 항상 문제가 되는 것은 과거의 자연환경의 조건을 초월하는 자연현상으로 문제가 발생한다. 그러나, 미래의 자연조건을 어떻게 해석할 것인가, 어느 정도로 안전율을 고려할 것인가는 비용과 직결되는 문제이기 때문에 그 범위의 규정이 매우 어렵다. 하나의 방법으로 구조물에 안전율을 충분히 고려하면 그러한 문제의 일부는 해결이 되겠지만, 투자비용의 증대뿐만 아니라 충분한 안전율을 고려하는 경우에도 해저면에 기반을 둔 직접파제, GBS(Gravity Base Structure, Photo.1.2(a, b))와 같이 중력구조물의 경우에 구조물의 주변에서 세굴, 그리고 본 연구에서 언급하고 있지는 않지만 부유식구조물(예로, 부방파제, FPSO) 등의 거동문제는 단순히 안전율만으로는 접근될 수 없다. 따라서, 앞으로 다가오는 해양의 시대에 있어서 가장 중요한 외력의 요소인 파랑과 구조물의 상호작용을 고 정도로 해석하는 것은 기본적이면서도 필수적인 문제이다.

앞에서 언급한 바와 같이 해안 및 해양공간에 구조물을 설치하고 사용함에 있어서 가장 중요한 것은 구조물의 안정성이다. 따라서, 설계에서 가장 중요한 문제는 구조물의 안전과 직결되는 환경조건을 파악하는 문제이다. 환경조건으로는 바람, 파랑, 저질의 조건 등이 있지만, 가장 중요한 요소는 파랑이다. 파랑은 발생의 원인은 바람 등 여러 가지 이유가 있지만, 파랑에 의한 구조물의 안정성은 해양에 설치하는 구조물의 설계와 시공에 가장 중요한 문제점이다. 또한, 최근 심해에 설치되는 Deep Draft Semi-Submersible offshore structure(Photo 1.2 (c)), Spar(Photo 1.2 (d))는 수심방향으로 깊게 설치되기 때문에 연직주상구조물의 형태로 해석이 가능하다고 판단되며, 파랑으로 인한 구조물에 작용하는 파력과 이로 인해 전달되는 힘은 Anchor line의 해석과 석유생산 Pipe와 연결된 Riser의 해석에서 가장 중요한 외력으로 입력되기 때문에 구조물에 작용하는 파력 및 파랑변형의 해석에 대한 중요성은 점점 증가되고 있으며, 이러한 파랑해석의 기술은 앞으로 해양개발에서 가장 필요하면서도 중요한 요소 중의 하나가 될 것이다.

해안과 해양에 설치되는 이러한 구조물에 있어서 파동장의 해석은 오래전부터 수행되어 왔지만, 파랑이 가지는 비선형현상을 어떻게 표현하고 해석하는가가 가장 주된 관심사의 하나였다. On & offshore engineer가 많이 사용하는 파력산정식인 Morison(1950)식은 구조물의 직경( $D$ )과 파장( $L$ )의 비가  $D/L < 0.2$ 인 경우, 즉 항력이 지배적 소형구조물(Photo 1.1)에 있어서는 적용성이 있지만,  $D/L > 0.2$ 인 대형구조물, 즉 항력보다 관성력이

지배적인 구조물에 있어서는 회절영향을 고려하여야 하고, 특히 구조물의 주변에 있어서는 비선형현상이 탁월하므로 비선형의 영향을 고려하여야 한다. 이러한 비선형해석의 중요성 때문에 소형구조물에 있어서도 해양구조물에 관한 설계기준의 하나인 DnV(1984)에서는 Stokes의 5차파이론으로 파동장을 평가하는 것을 의무화하고 있다.

뿐만 아니라, 파랑의 쇄파현상은 연안역에서 저면지질의 세굴과 퇴적, 경사호안의 배면에 월파로 인한 영향과 구조물에 작용하는 파력을 해석함에 있어서는 쇄파의 유무에 따라 그 변화가 심하므로 연안역에 설치되는 구조물에 있어서는 반드시 고려하여야 되는 요소이다.

또한, 비교적 천해역에 설치되는 SPM(Single Point Mooring), GBS(Photo 1.1,(b)), Platform 및 대형교각(Photo. 1.3) 등에서는 파랑에 의한 해저지반의 변화특성을 고려할 필요가 있으며, 특히 세굴은 구조물의 자체에 전도 등과 같은 안전문제에 직결되는 것으로 아주 중요한 문제이며, 세굴의 영향을 고려하는 경우에는 항력보다 관성력의 영향을 받는 회절파의 의한 세굴영향을 고려해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 파랑의 비선형현상을 수치해석적으로 접근할 수 있는 수치해석법을 검토함과 동시에, 대형구조물의 상호간섭에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 변화, 파랑의 쇄파현상과 연계된 구조물에 작용하는 비선형파력의 변화특성, 파랑에 의한 저면지형의 변동에 관한 특성들을 논한다.



Photo 1.1 A Fixed offShore jacket platform structure, Vietnam 11-2 site gas platform,  
Korea National Oil Corporation, 2006



(a)Exxon Neftegas Ltd Gravity Base Structure(GBS) 'Orlan', Sakhalin-1, Russia, 2005



(b) Hibernia Gravity-Based production Structure(GBS) 'Offshore Newfoundland', Canada, 1997



(c) Deep Draft Semi-Submersible platform(DDSS)



(d) Red Hawk cell spar, Gulf of Mexico, USA, 2004

Photo 1.2 Large cylindrical offshore structure.



Photo 1.3 BukHang Bridge located in Busan north port



(a)



(b)

(a)Thunder Horse, a semi-submersible platform owned by BP, the rig was evacuated for Hurricane Dennis. U.S. Coast Guard photograph, 2005

(b)Storm damages tanks and displaced by flooding

Photo 1.4 Damage to onshore & offshore Structure.

Source :

Photo 1.1 : Korea National Oil Corporation

Photo 1.2 :

(a) <http://www.sandwell.com>, (b)<http://www.abam.com>, (c), (d) <http://www.technip.com>

Photo 1.3 : designed by yooshin engineering corporation

Photo 1.4 :

(a)<https://www.piersystem.com>

(b)API 2006 Storage Tank Conference Tulsa, Oklahoma, Preparing Tanks for Hurricanes, Tank Industry Consultants, Inc.

## 2. 기존의 연구

### 2.1 비선형파동장의 해석

항력이 지배적인 소형구조물( $D/L < 0.2$ ,  $D$ 는 구조물의 대표직경,  $L$ 은 파장)과는 달리 관성력이 지배적인 대형구조물( $D/L > 0.2$ , )의 파력과 파랑변형의 해석에는 회절파의 영향을 고려하여야 한다(Patel, 1989). 회절파의 영향을 고려한 연구에 있어서 대형단일원주구조물의 경우에 선형회절이론에 대한 해석해가 MacCamy & Fuchs(1954)에 의해 처음 유도되었고, 임의형상의 단면을 갖는 복수연직주상구조물의 경우에 대해서 SDM(Source Distribution Method)에 의한 Isaacson(1978)의 수치해법이 제안되어 있다. 그러나, 파랑의 비선형성이 커지는 경우에는 비선형의 성분이 무시될 수 없을 정도로 큰 값을 나타내므로(Goda, 1983) 구조물에 작용하는 파력과 파랑변형을 보다 정확히 예측하기 위해서는 비선형해석이 요구된다.

비선형회절파이론은 크게 약비선형의 포텐셜모델과 강비선형의 포텐셜모델로 구분되며, 약비선형의 포텐셜모델은 파형경사를 파라미터로 한 섭동전개법에 기초하고 있다.

약비선형 포텐셜모델에 의한 연구는 비선형(2차오더)파력을 산정하는 수치계산방법으로는 2배주파수성분에 대한 동차의 수면경계조건으로부터 얻어지는 Radiation potential과 Haskind법을 적용하여 2차오더의 파력을 계산하는 Molin(1979), Eatock & Hung(1987) 등의 연구와 Haskind법과 자유수면의 무한적분에 대해 근사적분법을 적용하여 임의형상의 복수구조물에 작용하는 파력을 산정하는 増田 등(1986)의 연구를 대표적으로 들 수 있다. 그러나, Haskind법에 기초를 두고 있는 이들의 연구에서는 2차속도포텐셜을 유도할 수 없기 때문에 파력은 산정될 수 있지만, 구조물의 주변에서 비선형파랑변형이나 파랑의 처오름높이를 검토할 수 없는 단점이 있다.

2차오더의 회절산란포텐셜을 유도하고 있는 연구로서는 Green함수를 이용하는 Kriebel(1990), Kim & Yue(1989), Garrison(1979)(Green함수와 SDM법을 이용), Chen & Hudspeth(1982)(Green함수와 고유함수전개법을 이용)의 연구와 Green함수를 사용하지 않고 Hybrid법을 사용하여 임의형상의 연직주상구조물 또는 수중연직주상구조물에 적용할 수 있는 眞田 등(1996), 水谷 등(1998)의 연구가 수행되어 있지만, 이들의 이론은 복



수연직주상구조물에 적용될 수 없는 단점이 있다. 또한, 자유표면의 비선형경계를 엄밀하게 취급하는 강비선형의 포텐셜모델은 경계요소법에 근거한 계산법이 제안되고 있지만, 고립파 이외의 입사파에 대한 개경계처리에 문제점이 지적되고 있다(예로, Issacson, 1982).

이상의 비선형해석법은 비쇄파시의 파동장을 대상으로 한 연구결과로, 파동장에서 가장 큰 설계요소인 쇄파의 발생에 따른 구조물에 작용하는 파력 및 파랑변형의 해석에는 적용될 수 없는 한계를 가진다.

파의 쇄파현상은 연안역에서 가장 중요한 수리학적 요소 중에 하나로, 쇄파지점은 해안에 구조물을 설치한 경우에 있어서 기본적인면서도 중요한 요소이다. 쇄파에 대한 연구는 Stokes(1880)의 연구 이래로 지속적으로 연구되어 왔으며, 쇄파에 관한 대표적인 수치해석의 연구로 Green함수에 기초한 경계적분방정식으로부터 쇄파시의 수면파형을 재현하고 있는 Longuet-Higgins & Cokelet(1976), Kioka(1983), 織田 등(1993), 金 등(1997, 1998)의 연구와 Cauchy의 적분정리에 기초한 경계적분방정식을 적용하고 있는 Dold & Peregrine(1984)의 연구가 있으나, 경계적분방정식을 사용하는 상기의 수법들은 대부분 포텐셜이론에 기초하고 있으므로 쇄파후의 파랑변형 및 파랑의 재생성과정을 해석할 수 없다는 한계점이 있다. 다른 방법으로는 유한차분법에 기초한 MAC(Marker And Cell)법을 이용한 Welch et al.(1965)의 연구가 있다. MAC법은 자유표면의 위치를 계산하는 경우에 가상의 Marker요소를 사용하므로 유체영역의 불규칙성에 기인하여 Cell에서 많은 Marker가 필요하므로 계산시간이 많이 소요되는 단점 때문에 3차원으로의 확장이 어렵다.

따라서, 쇄파를 포함하는 이러한 비선형성분을 고정도로 해석하기 위해 해안·해양 공학분야에서 파랑과 구조물과의 비선형상호간섭에 따른 복잡한 자유수면의 거동특성을 해석할 수 있는 Navier-Stokes방정식과 VOF(Volume Of Fluid)법(Full-nonlinear해석법)을 결합한 연구가 최근 활발히 수행되고 있으며, 3차원파동장에 설치된 구조물에 작용하는 파력의 해석에까지도 확장·적용되고 있다(허동수 등, 2006). 그러나, 이 해석법은 대부분이 2차원파동장을 대상으로 하며(김도삼과 이광호, 2002), 지배방정식으로 주어지는 Navier-Stokes 방정식의 계산수법으로 SOLA(numerical SOLution Algorithem for transient fluid flow; Hirt and Nichols, 1981; Hur and Mizutani, 2003; Kawasaki, 1999)기법으로 알려져 있는 HSMAC(Highly Simplified MArker and Cell scheme)기법을 이용하고 있다.

## 2.2 파동장에서 지형변동의 해석

파동장에서 구조물의 주변에 발생하는 지형변동(세굴과 퇴적)에 대해서는 크게 3가지로 구분되어 연구되어 왔다. 첫 번째는 와류가 세굴의 지배적인 영향을 차지하는 구조물의 직경과 파장의 비( $D/L$ )가 작거나 Keulegan-Carpenter수(이하,  $KC$ 수)가 큰 소형구조물이고, 두 번째는  $D/L > 0.2$ ,  $KC < 0.5$ 인 경우의 구조물에는 와류의 영향이 작으므로(勝井 등, 1992) 회절파의 영향을 고려해야 되는 경우이며, 마지막으로 방파제나 안벽의 Trunk부와 같이 2차원적으로 취급이 가능한 것으로 크게 나누어 연구가 진행되고 있다.

파동장에 있어서 지형변동에 대한 연구의 대부분은 앞서 언급한 소형구조물과 방파제와 같은 2차원적인 구조물이고, 회절파의 영향을 고려하여야 하는 대형구조물에 있어서는 비교적 연구가 많지 않다.

2차원적으로 해석하는 대형해안구조물의 전면영역에서 세굴현상은 Xie(1981, 1985), 人江 등(1984), Sumer et al.(2000)를 포함한 많은 연구가 있다. 그러나,  $KC > 6$ 이상인 소구경 구조물의 주변에서 국부세굴에 대한 연구는 Sumer et al.(1992a, 1992b, 1993)의 연구를 비롯하여 많은 연구가 있다. 회절파의 영향을 고려하여야 하는  $D/L > 0.2$ 인 대구경구조물을 대상으로 한 연구는 대표적으로 Rance(1980)를 들 수 있고, 다음으로 東江 등(1985, 1991), 勝井 등(1990, 1992), 齊藤 등(1988), Katsui & Toue(1988)의 연구를 들 수 있다. 원주의 주변에서 지형변동에 대한 시뮬레이션에 있어서도 齊藤 등(1988), 勝井 등(1990, 1992)에 의해 대구경원주를 대상으로 계산이 되어 왔다. 齊藤 등(1988)의 연구는 MacCmay & Fuchs의 회절파의 해석해를 이용하여 파고분포를 산정하고, 흐름은 경계층 외부의 질량수송 속도와 Radiation stress에 의한 흐름을 산정하여 渡邊 등(1984)의 의해 제안된 표사이동공식을 이용하여 대형원주구조물의 주변에서의 토사이동에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 岩田 등(1993)은 SDM법을 이용하여 2개의 연직원주구조물의 주변으로 확장·적용하였지만, 이들의 해석은 구조물이 수중연직주상구조물이나 수심방향으로 단면이 변화하는 경우에 적용될 수 없고, 파의 비선형을 고려하지 않고 있다.

### 3. 연구의 목적과 구성

파와 구조물의 상호간섭에 있어서 소형구조물에 선형파의 조건을 적용한 연구에서부터 회절파의 영향을 고려하여야 하는 대형구조물에 있어서 MacCamy & Fuchs(1954)의 해석해에 이르기까지 많은 연구가 수행되었고, 또한 이를 확장한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그리고, 파와 구조물에 작용하는 비선형현상을 규명하기 위해 다양한 수치적인 방법으로 연구가 진행되어 왔다. 2장에서 언급하는 2차의 속도포텐셜을 유도하고 경계 적분법(Boundary Integral Element Method:BIEM)과 섭동전개법(Perturbation expansion method)을 병용하는 방법(村上 등, 1993)을 확장·적용하여 구조물에 의한 회절파의 상호간섭을 고려한 비선형파력과 비선형파랑변형을 해석하는 방법은 기존의 연구에 비해 매우 우수하고 적용성이 높지만, 쇄파의 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다.

연직주상구조물에 작용하는 파랑에 의해 구조물의 주변에 발생하는 침식과 퇴적현상의 해석법에 있어서 기존의 연구는 수심의 변화가 없는 원주구조물에만 적용가능하지만, 세굴과 퇴적에서 중요한 요소의 하나인 저면유속에 비선형성을 고려하지 못하고 있다.

본 연구에서는 Full-nonlinear의 해석법(자유수면의 추적에 3차원 VOF법을, 유체장에 Navier-Stokes의 운동방정식을 적용하는 해석법)을 적용하며, 이의 계산수법으로 Two-step projection기법(Chorin, 1968)을 사용하여 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력 및 비선형파랑변형의 특성과 비쇄파시 및 쇄파후에 구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형의 변화특성을 검토한다.

본 해석법으로부터 얻어진 저면유속벡터의 변화특성과 구조물의 주변에서 세굴과 퇴적현상을 기존의 실험결과와 비교·검토하고, 수중에 잠긴 연직주상구조물(이하, 수중연직주상구조물)에 있어서 쇄파시 저면유속분포의 특성과 이에 따른 세굴 및 퇴적의 경향을 검토한다.

이에 따라 본 논문은 총 5장으로 구성되며, 각 장의 내용은 다음과 같다.

1)제 1장에서는 본 연구의 배경과 목적, 기존의 연구 및 본 연구의 구성에 대해 간단히 기술한다.

2)제 2장에서는 임의형상의 단일연직주상구조물의 경우에 Hankel함수를 Green함수로 사용하는 경계적분법과 섭동전개법을 병용하는 방법을 복수연직주상구조물의 경우로 확장하여 연직주상구조물의 단면과 구조물간의 간격에 따른 비선형파력과 파랑변형을 해석한다.

3)제 3장에서는 비쇄파시의 파동장을 대상으로 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF법(Full-nonlinear해석법)을 결합한 해석법으로부터 복수연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 파랑변형을 해석한다. 연직주상구조물의 단면의 변화(원형과 사각형)와 구조물의 간격변화에 따른 비선형파력 및 비선형파랑변형의 특성을 고찰한다.

4)제 4장에서는 쇄파후의 파동장에 제 3장의 본 해석법을 적용하여 경사사면을 지나 일정수심이 유지되는 영역에 위치한 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형을 해석한다. 파고변화 및 구조물의 위치변화에 따라 쇄파후에 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력의 변화특성을 고찰한다.

5)제 5장에서는 제 3장의 본 해석법에 의해 산정된 저면유속벡터의 특성과 기존의 세굴과 퇴적에 관한 수치실험결과와 비교한다. 비선형성분을 포함하고 있는 저면유속성분을 齊藤 등(1988)이 제안한 토사이동식에 적용하여 지형변동의 수치시뮬레이션을 수행하고 기존의 수치실험결과와 비교한다. 또한, 기존의 연구에서 접근할 수 없었던 수중연직주상구조물에 의해 쇄파가 발생하는 경우에 구조물의 주변에서 지형변동의 특성을 해석하고, 東江 등(1985)의 수치실험결과를 비교하여 토사이동식의 적용성을 논한다.

6)제 6장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 논문의 종합결론으로 한다.

## <참고문헌>

- 김도삼, 이광호 (2002) : 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지, 16(2), pp.1-5.
- 허동수, 염경선, 배기성 (2006) : 혼성방파제에 작용하는 3차원 파압구조에 미치는 위상차의 영향, 대한토목학회논문집, 26(5B), pp.563-572.
- Chorin, A.J. (1968) : Numerical solution of the Navier-Stokes equations, Math. Comp., 22, pp.745-762.
- Chen, M.C. and R.T. Hudspeth (1982) : Nonlinear diffraction by eigenfunction expansions, Proc. ASCE, Vol.108, No.WW3, pp.306-325.
- Eatock Taylor, R. and S.M Hung (1987) : Second-order diffraction force on vertical cylinder in regular waves, Applied Ocean Res., Vol.9, No.1, pp.19-30.
- Garrison, C.J. (1979) : Hydrodynamic loading of large offshore structure : three dimensional source distribution methods, Numerical Method in Offshore Engineering, O. Zienkiewics, R. Lewis and K. Stagg eds., John Wiley Sons, pp.97-140.
- Goda, Y. (1983) : An unified nonlinearity parameter of water waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., 22(3), pp.3-30.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981) : Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, pp.201-225.

- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003) : Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater, *Coastal Eng.*, 47, pp. 329-345.
  
- Isaacson, M.Q.(1978) : Vertical cylinders of arbitrary section in wave, *J. Waterway, Coastal and Ocean Eng.*, 104(WW4), pp.309-322.
  
- Isaacson, M.Q. (1982) : Fixed and floating axisymmetric structures in waves, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE*, 108(WW2), pp.180-199.
  
- Katsui, H. and T. Toue (1988) : Inception of sand motion around a large obstacle, *Proc, 21st ICCE*, Vol.II, pp.1310-1322.
  
- Kim, M.H. and D.K.P. Yue (1989) : The complete second-order diffraction solution for an axisymmetric body, part 1. monochromatic incident waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.200, pp.235-264.
  
- Kriebel, D.L. (1990) : Nonlinear wave interaction with vertical cylinder, part I : diffraction theory, *Ocean Eng.*, Vol.17, No.4, pp.345-377.
  
- Kawasaki, K. (1999) : Numerical simulation of breaking and post breaking wave deformation process around a submerged breakwater, *Coastal Eng. in Japan*, 41(3), pp.201-223.
  
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954) : Wave forces on piles : a diffraction, *Tech. Memo.*, No.69, Beach Erosion Board, pp.1-17.
  
- Morison. J.R., J.W. Johnson, M.P. O'Brien and S.A. Schaaf (1950) : The force exerted by surface wave on piles, *Pub. No.284, Petroleum Trans., AIME*, Vol.189, pp.149-154.

- Molin, B. (1979) : Second-order diffraction loads upon three-dimensional bodies, Applied Ocean Res., Vol.1, No.4, pp.197-202.
- Patel, M.H. (1989) : Dynamics of offshore structure, Butterworths, London, pp.188-190.
- Rance P. J. (1980) : The Potential for scour around large Object, Scour Prevention Techniques around Off-shore Structures, The Society for Underwater Technology, pp.41-51.
- Stokes, G.G (1880) : On the theory of oscillatory waves. In Mathematical and Physical Papers, Vol.1. Cambridge University Press, London England, pp.315-326.
- Sumer, B.M., Fredsøe, J. (2000) : Experimental study of 2D scour and its protection at rubble-mound breakwater, Coastal Engineering, Elsevier, Vol.40, pp.59-87.
- Sumer, B. M., Fredsøe, J. and Christiansen N. (1992a) : Scour around vertical piles in waves, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol.118, pp.15-31.
- Sumer, B.M., Christiansen N. and Fredsøe J. (1992b) : Time scale of scour around a vertical piles, Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol.III, pp.308-315.
- Sumer, B.M., Christiansen N. and Fredsøe J. (1993) : Influence of cross section on wave scour around piles, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol.99, pp.477-495.
- Veritas, D.N. (1984) : Rules for classification of mobile offshore unit.
- Xie, S.L. (1981) : Scouring patterns in front of vertical breakwater and their influence on the stability of the foundations of the breakwaters, Report, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, September, 61p.

- ・ Xie, S.L. (1985) : Scouring patterns in front of vertical breakwaters, Acta Oceanologica Sinica, Vol.4, pp.153-164.
  
- ・ 渡辺 晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊 山勉 (1984) : 構造物設置に伴う三次元海濱変形の数値予測モデル, 海岸工学講演会論文集, 31, pp.103-107.
  
- ・ 人江 功, 近藤隆道, 赤石正廣, 寺崎賢次 (1984) : 重複波による防波堤前面での海底洗掘・底質の移動機構に着目した研究, 海岸工学論文集, 31, pp.350-354.
  
- ・ 東江隆夫, 勝井秀博 (1985) : 大口徑圓柱周辺の洗掘現象, 海岸工学講演会論文集, 32, pp.425-429.
  
- ・ 増田光一, 坂田親弘, 加藤涉 (1986) : 複数の柱狀體に作用する非線形波力に関する研究, 造船學會誌, 第 160 号, pp.176-184.
  
- ・ 斉藤栄一, 佐藤慎司, 柴山知也 (1988) : 波動場における大口徑圓周辺の局所洗掘に関する研究, 海岸工学論文集, 35, pp.392-396.
  
- ・ 勝井秀博, 東江隆夫 (1990) : 大口徑圓柱周辺の移動限界と洗掘, 海岸工学論文集, 37, pp.379-383.
  
- ・ 東江隆夫, 勝井秀博, 灘岡和夫 (1991) : 大口徑圓柱周辺の砂の移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 38(1), pp.451-455.
  
- ・ 勝井秀博, 東江隆夫 (1992) : 大型海洋構造物周辺の洗掘深に関する定量評価, 海岸工学論文集, 39(1), pp.491-495.



- ・ 岩田好一郎, 金昌濟, 安部智彦 (1993) : 二基の大口徑圓筒構造物周辺の地形變化に関する研究, 海岸工學論文集, 40(1), pp.526-530.
- ・ 村上啓介, 吉田明德, 人江 功 (1993) : 任意断面形状の鉛直柱体と波の非線形干渉解析法, 海岸工学論文集, 40, pp.846-850.
- ・ 眞田 武, 岩田好一郎, 水谷法美 (1996) : 大口徑單圓管構造物による非線形回折波の2次近似理論, 土木學會論文集, No.551, pp.75-87.
- ・ 水谷法美, 眞田 武, 水野香織, 藤岡才夫, 川島直人, 岩田好一郎 (1998) : 軸対称構造物および任意断面直立構造物による非線形回折波に関する研究, 海岸工学論文集, 45, pp. 831-835.

---

# 2장

## Stokes의 2차파이론에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석

---

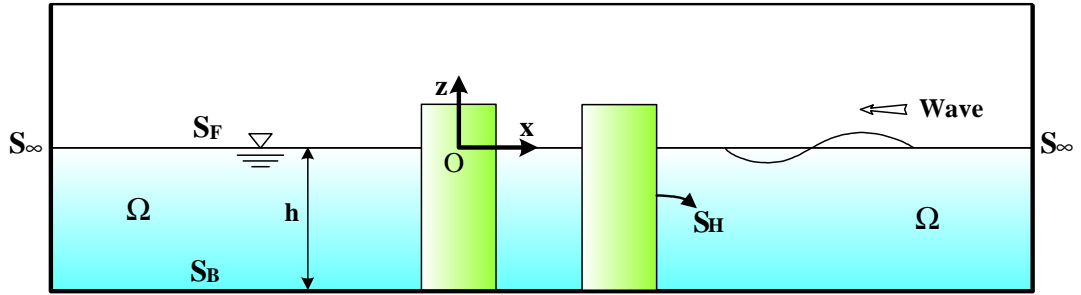
### 1. 개요

본 장에서는 원형, 정사각형 및 직사각형의 단면을 갖는 1개 및 2개의 연직주상구조물에 대해 Stokes의 2차파이론에 기초한 섭동전개법(Perturbation expansion method)과 경계적분법(Boundary Integral Element Method:BIEM)을 병용하여 하는 방법(村上 등, 1993)을 확장·적용하여 구조물의 단면 및 설치간격, 파의 입사각 및 파의 비선형성을 나타내는 비선형파라미터(Goda,1983)의 변화에 따른 비선형파랑변형 및 파력의 변화특성을 검토하는 것으로 한다.

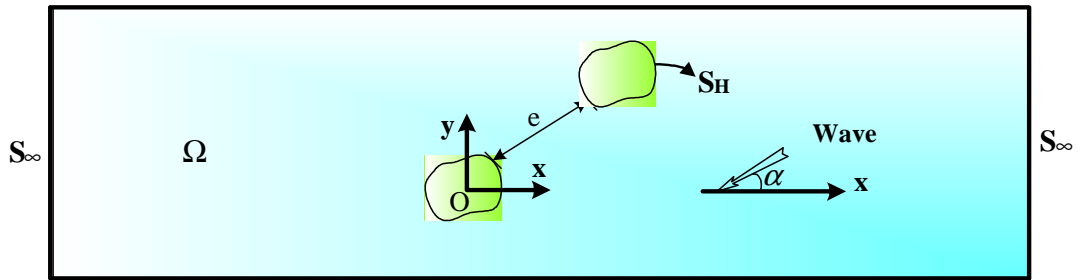
### 2. 수치해석이론

#### 2.1 지배방정식과 자유수면경계조건

Fig. 2.1에서 나타내고 있는 일정수심  $h$ 의 3차원파동장에 설치된 임의형상단면의 복수연직주상구조물에 Stokes의 2차파가  $x$ 축에 대해 입사각  $\alpha$ 로 입사하는 경우를 고려한다. 유체를 비점성·비압축성의 이상유체로, 유체운동을 비회전으로 가정하면 파동장을 속도포텐셜  $\Phi(x, y, z, t)$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 이 때  $\Phi$ 는 전 유체영역에서 식(2.1)의 Laplace방정식을 만족하여야 하고, 수면  $z = \eta(x, y, t)$ 에서 운동학적 및 동역학적 자유수면경계조건은 다음과 같은 식(2.2)와 식(2.3)으로 주어진다.



(a) Plan view



(a) Side view

Fig. 2.1 Definition sketch.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{in } \Omega) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (z = \eta) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} = Q \quad (z = \eta) \quad (2.3)$$

여기서,  $\eta$  는 정지수면에 대한 자유수면의 변동,  $Q$  는 Bernoulli상수,  $g$  는 중력가속도,  $x, y, z$  는 Fig.2.1에 정의된 공간좌표,  $t$  는 시간을 각각 나타낸다.

## 2.2 섭동전개와 복합수면경계조건

### 2.2.1 섭동전개

속도포텐셜  $\Phi$ , 수면변동  $\eta$ , Bernoulli상수  $Q$ 가 미소섭동파라메트  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = k^{(1)}\eta_0$ ,  $k^{(1)}$ 는 선형파의 파수,  $\eta_0$ 는 선형파의 입사진폭으로  $\eta_0 = H/2$ ,  $H$ 는 선형파의 입사파고)에 의해 다음의 섭동전개가 가능한 것으로 가정한다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{g}{k^{(1)}} \left[ \varepsilon \phi_1(x, y, z, t) + \varepsilon^2 \phi_2(x, y, z, t) + \dots \right] \quad (2.4a)$$

$$\eta(x, y, t) = \frac{1}{k^{(1)}} \left[ \varepsilon \eta_1(x, y, t) + \varepsilon^2 \eta_2(x, y, t) + \dots \right] \quad (2.4b)$$

$$Q = \frac{g}{k^{(1)}} \left[ \varepsilon Q_1 + \varepsilon^2 Q_2 + \dots \right] \quad (2.4c)$$

여기서,  $\sigma$ 는 각주파수( $=2\pi/T$ ,  $T$ 는 주기)이다.

### 2.2.2 복합수면경계조건

복합수면경계조건을 구하기 위해서 식(2.2)와 식(2.3)을  $z=0$ 에 대해 Taylor급수전개한 결과에 식(2.4)를 대입하여  $\mathbf{O}(\varepsilon)$ ,  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 오더별로 정리하고, 각 오더에 있어서 해당하는 수면변동을 소거하면 다음의 복합수면경계조건을 얻는다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} - \frac{\sigma}{g} \frac{\partial Q_1}{\partial t} = 0 \quad (z=0) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_2}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma}{g} \frac{\partial Q_2}{\partial t} = & -\frac{1}{k\sigma} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ & - \frac{1}{k\sigma} \eta_1 \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left( \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \right) \right\} \end{aligned} \quad (z=0) \quad (2.6)$$

여기서,  $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 = -\frac{1}{4k^{(1)}\lambda_0} \left( \lambda_0^2 - (k^{(1)})^2 \right)$ ,  $\lambda_0 = \frac{\sigma^2}{g}$ 이며,  $Q_2$ 는 후술하는 식(2.46)로부터 무한원방의  $S_\infty$ 에서는 평균수심이  $h$ 라는 가정에서 구해진 결과이다.

식(2.5) 및 식(2.6)에서  $\mathbf{O}(\varepsilon)$ 의 포텐셜함수  $\phi_1$ 은 기본주파수  $\sigma$ 의 변동량이고,  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 포텐셜함수  $\phi_2$ 와 수면변동  $\eta_2$ 는 시간에 관계없는 정상성분과 배주파수  $2\sigma$ 의 변동성분을 포함하고 있으므로 식(2.4a) 및 식(2.4b)에서 각 오더의 변동량을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \Phi_1(x, y, z, t) = \phi_1^{(1)}(x, y, z) e^{-i\sigma t} \\ \Phi_2(x, y, z, t) = \phi_2^{(0)}(x, y, z) + \phi_2^{(2)}(x, y, z) e^{-2i\sigma t} \\ \eta_1(x, y, t) = \eta_1^{(1)}(x, y) e^{-i\sigma t} \\ \eta_2(x, y, t) = \eta_2^{(0)}(x, y) + \eta_2^{(2)}(x, y) e^{-2i\sigma t} \end{cases} \quad (2.7)$$

여기서,  $i = \sqrt{-1}$ 이다.

### 2.2.3 First order

이상으로부터  $\mathbf{O}(\varepsilon)$ 의 성분을 기술하면 Laplace방정식과 경계조건들은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \phi_1^{(1)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_1^{(1)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_1^{(1)}}{\partial z^2} = 0 \quad (in \ \Omega) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial z} - \lambda_0 \phi_1^{(1)} = 0 \quad (\text{on } S_F) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad (\text{on } S_B) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } S_H) \quad (2.11)$$

여기서,  $n$ 은 구조물의 표면에서 외향법선방향, 식(2.10)과 식(2.11)은 해저 및 구조물의 표면에서 경계조건을 나타낸다.

포텐셜함수  $\phi_1^{(1)}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \phi_1^{(1)}(x, y, z) = \phi_1(x, y) \cdot \frac{\cosh k^{(1)}(z+h)}{\cosh k^{(1)}h} \\ \phi_1(x, y) = \phi_l^{(1)}(x, y) + \phi_s^{(1)}(x, y) \end{cases} \quad (2.12)$$

여기서,  $\phi_l^{(1)}(x, y)$ 는 입사파성분을,  $\phi_s^{(1)}(x, y)$ 는 산란파성분을 나타내며,  $k^{(1)}$ 에 대해서는 다음의 분산관계식이 만족되어야 한다.

$$k^{(1)} \tanh k^{(1)}h = \lambda_0 \quad (2.13)$$

그리고,  $\phi_l^{(1)}(x, y)$ 는 다음식으로 주어진다.

$$\phi_l^{(1)}(x, y) = -ie^{-ik^{(1)}(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \quad (2.14)$$

식(2.12)가 식(2.8)을 만족하기 때문에  $\phi_s^{(1)}(x, y)$ 는 다음의 Helmholtz 방정식으로 귀착되며, 또한 무한원방의  $S_\infty$ 에서 Sommerfeld의 방사경계조건을 동시에 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_s^{(1)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_s^{(1)}}{\partial y^2} + (k^{(1)})^2 \phi_s^{(1)} = 0 \quad (2.15)$$

## 2.2.4 Second order

$\mathbf{O}(\varepsilon^2)$  에 관한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial^2 \phi_2^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_2^{(2)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_2^{(2)}}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{in } \Omega) \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_2^{(2)}}{\partial z} - 4\lambda_0 = & -\frac{i}{k^{(1)}} \left\{ \left( \frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ & + \frac{\eta_1^{(1)}}{2k^{(1)}} \left\{ \lambda_0 \frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial z} - \frac{\partial^2 \phi_1^{(1)}}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (\text{on } S_F) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \phi_2^{(2)}}{\partial z} = 0 \quad (\text{on } S_B) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \phi_2^{(2)}}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } S_H) \quad (2.19)$$

여기서, 식(2.18)과 식(2.19)는 해저면 및 구조물의 표면에서 경계조건을 나타낸다.

$\mathbf{O}(\varepsilon^2)$  의 포텐셜함수  $\phi_2^{(2)}$  는 다음과 같이 입사파성분  $\phi_I^{(2)}$  , 구속파성분  $\phi_L^{(2)}$  및 자유파성분  $\phi_F^{(2)}$  로 각각 구성된다.

$$\phi_2^{(2)}(x, y, z) = \phi_I^{(2)}(x, y, z) + \phi_L^{(2)}(x, y, z) + \phi_F^{(2)}(x, y, z) \quad (2.20)$$

여기서,  $\phi_I^{(2)}$  는 Stokes의 2차파에서 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{cases} \phi_I^{(2)}(x, y, z) = \phi_I^{(2)}(x, y) \cdot \frac{\cosh 2k^{(1)}(z+h)}{\cosh 2k^{(1)}h} \\ \phi_I^{(2)}(x, y) = -\frac{3i}{8} \frac{\lambda_0}{k^{(1)}} \frac{\cosh 2k^{(1)}h}{\sinh^4 k^{(1)}h} e^{-i2k^{(1)}(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \end{cases} \quad (2.21)$$

식(2.17)에서  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 자유수면경계조건은  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 압력항으로 인해 비동차형으로 되므로 식(2.20)의  $\phi_L^{(2)}$ 은 비동차경계조건을 만족하는 구속과성분을 나타내고,  $\phi_F^{(2)}$ 은 동차의 경계조건을 만족하는 자유과성분을 나타낸다. 그리고, 식(2.20)와 식(2.21)을 식(2.16), 식(2.17) 및 식(2.18)에 대입하면  $\phi_L^{(2)}$ 과  $\phi_F^{(2)}$ 에 관한 지배방정식과 경계조건을 구할 수 있다. 먼저,  $\phi_L^{(2)}$ 에 관한 지배방정식과 경계조건을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi_L^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_L^{(2)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_L^{(2)}}{\partial z^2} = 0 \quad (in \ \Omega) \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_L^{(2)}}{\partial z} - 4\lambda_0 \phi_L^{(2)} &= \frac{i}{2k^{(1)}} \left( \lambda_0^2 - (k^{(1)})^2 \right) (\phi_s^{(1)})^2 \\ &+ \frac{i}{k^{(1)}} \left\{ \left( \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \lambda_0^2 (\phi_s^{(1)})^2 \right\} \\ &+ \frac{2i}{k^{(1)}} \left\{ \frac{\partial \phi_l^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_l^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial y} + \lambda_0^2 \phi_l^{(1)} \phi_s^{(1)} \right\} \\ &+ \frac{i}{k^{(1)}} \left( \lambda_0^2 - (k^{(1)})^2 \right) \phi_l^{(1)} \phi_s^{(1)} \end{aligned} \quad (on \ S_F) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \phi_L^{(2)}}{\partial z} = 0 \quad (on \ S_B) \quad (2.24)$$

$\phi_L^{(2)}$  대해서 식(2.23)과 식(2.24)을 만족하는 식(2.22)의  $\phi_L^{(2)}$ 를 다음의 형태로 가정한다.

$$\phi_L^{(2)}(x, y, z) = \gamma \phi_L^{(2)}(x, y) \cdot \frac{\cosh 2k^{(1)}(z+h)}{\cosh 2k^{(1)}h} \quad (2.25)$$



여기서,  $\phi_L^{(2)}$  과  $\gamma$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned}\phi_L^{(2)} = & \left\{ \left( \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial y} \right)^2 + \lambda_0^2 \left( \phi_s^{(1)} \right)^2 \right\} \\ & + 2 \left\{ \frac{\partial \phi_l^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_l^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \phi_s^{(1)}}{\partial y} + \lambda_0^2 \phi_l^{(1)} \phi_s^{(1)} \right\} \\ & + \frac{1}{2} \left( \lambda_0^2 - \left( k^{(1)} \right)^2 \right) \left( \phi_s^{(1)} \right)^2 + \left( \lambda_0^2 - \left( k^{(1)} \right)^2 \right) \phi_l^{(1)} \phi_s^{(1)}\end{aligned}\quad (2.26)$$

$$\gamma = \frac{i}{2 \left( k^{(1)} \right)^2} \frac{1}{\tanh 2k^{(1)}h - 2 \tanh k^{(1)}h} \quad (2.27)$$

$\phi_L^{(2)}$  에 대한 Laplace방정식은 다음의 Helmholtz방정식으로 귀착되고,  $\phi_L^{(2)}$  는 무한원 방의  $S_\infty$  에서 Sommerfeld의 방사경계조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_L^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_L^{(2)}}{\partial y^2} + \left( 2k^{(1)} \right)^2 \phi_L^{(2)} = 0 \quad (2.28)$$

다음으로,  $\phi_F^{(2)}$  에 관한 지배방정식과 경계조건은 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \phi_F^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_F^{(2)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_F^{(2)}}{\partial z^2} = 0 \quad (in \ \Omega) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \phi_F^{(2)}}{\partial z} - 4\lambda_0 \phi_F^{(2)} = 0 \quad (on \ S_F) \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial \phi_F^{(2)}}{\partial z} = 0 \quad (on \ S_B) \quad (2.31)$$

$\phi_F^{(2)}$ 에 대하여 식(2.30)과 식(2.31)을 만족하는 식(2.29)의 일반해는 다음과 같은 형태로 나타내어진다.

$$\phi_F^{(2)}(x, y, z) = \gamma \phi_F^{(2)}(x, y) \cdot \frac{\cosh k^{(2)}(z+h)}{\cosh k^{(2)}h} \quad (2.32)$$

여기서,  $k^{(2)}$ 는 다음의 분산관계식을 만족하는 고유치이다.

$$4\lambda_0 = k^{(2)} \tanh k^{(2)}h \quad (2.33)$$

$\phi_F^{(2)}$ 역시 다음의 Helmholtz방정식을 만족하여야 하며, 동시에 무한원방의  $S_\infty$ 에서 Sommerfeld의 방사경계조건을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_F^{(2)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_F^{(2)}}{\partial y^2} + \left(k^{(2)}\right)^2 \phi_F^{(2)} = 0 \quad (2.34)$$

### 2.2.5 Green 공식과 $\phi(x, y)$

Fig. 2.2에서  $X_p$ 가 경계선  $\Gamma$ 상에 있는 경우에  $X_p$ 를 중심으로 반경  $\xi$ 의 반원을 설정하여 특이점을 제외하고,  $\xi \rightarrow 0$ 의 극한치를 취함으로서 경계선  $\Gamma$ 상에서의  $\phi(X_p)$ 은 다음의 Green공식으로 주어질 수 있다.

$$\phi(X_p) = \frac{i}{2} \int_{\Gamma} \left\{ \phi(X_b) \frac{\partial H_0^{(1)}(\mu r)}{\partial n} - H_0^{(1)}(\mu r) \frac{\partial \phi(X_b)}{\partial n} \right\} ds \quad (2.35)$$

여기서,  $H_0^{(1)}$ 은 0차제1종 Hankel함수이다.

$H_0^{(1)}(\mu r)$ 에 대해서  $\mu$ 를 각각  $k^{(1)}$ ,  $2k^{(1)}$  및  $k^{(2)}$ 로 치환한다면  $\phi_S^{(1)}$ ,  $\phi_L^{(2)}$  및  $\phi_F^{(2)}$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

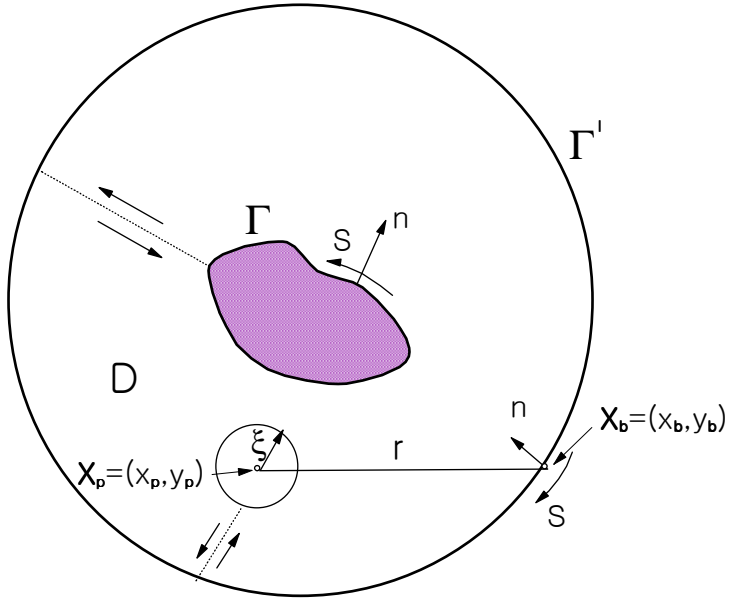


Fig. 2.2 Special point in open field and integral boundary.

$$\begin{aligned} \varphi_S^{(1)}(x_p, y_p) = \kappa \int_{\Gamma} \left\{ \varphi_S^{(1)}(x_b, y_b) \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(1)}(k^{(1)}r) \right. \\ \left. - H_0^{(1)}(k^{(1)}r) \frac{\partial}{\partial n} \varphi_S^{(1)}(x_b, y_b) \right\} ds \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \varphi_L^{(2)}(x_p, y_p) = \kappa \int_{\Gamma} \left\{ \varphi_L^{(2)}(x_b, y_b) \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(1)}(2k^{(1)}r) \right. \\ \left. - H_0^{(1)}(2k^{(1)}r) \frac{\partial}{\partial n} \varphi_L^{(2)}(x_b, y_b) \right\} ds \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \varphi_F^{(2)}(x_p, y_p) = \kappa \int_{\Gamma} \left\{ \varphi_F^{(2)}(x_b, y_b) \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(1)}(k^{(2)}r) \right. \\ \left. - H_0^{(1)}(k^{(2)}r) \frac{\partial}{\partial n} \varphi_F^{(2)}(x_b, y_b) \right\} ds \end{aligned} \quad (2.38)$$

여기서,  $\kappa$ 는 점  $(x_p, y_p)$ 가 경계면상에 존재할 때는  $\kappa=i/2$ , 유체영역의 내부에 존재할 때는  $\kappa=i/4$ 로 주어진다.

그리고, 식(2.12)와 식(2.20)을 각각 식(2.11)과 식(2.19)에 대입하고  $\cosh k^{(1)}(z+h)$ 와  $\cosh k^{(2)}(z+h)$ 를 각각 곱하여  $-h \leq z \leq 0$  구간에 대해 적분을 수행하면 구조물과 유체영역의 경계면  $S_H$ 에서 다음의 경계조건식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \varphi_s^{(1)}}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_l^{(1)}}{\partial n} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial \varphi_F^{(2)}}{\partial n} = -\beta \left( \frac{\partial \varphi_l^{(2)}}{\partial n} + \gamma \frac{\partial \varphi_L^{(2)}}{\partial n} \right) \quad (2.40)$$

여기서,  $\beta = \frac{i}{4k^{(1)}\lambda_0} \frac{1}{M_0} \frac{1}{\gamma} \frac{(k^{(2)})^2}{(2k^{(1)})^2 - (k^{(2)})^2}$ ,  $M_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2k^{(2)}h}{\sinh 2k^{(2)}h} \right)$  이다.

## 2.2.6 이산화

Fig. 2.3 에서와 같이 구조물과 유체영역의 경계면  $\Gamma$ 를  $N_2$  개의 미소요소  $\Delta S_j$  ( $j=1, 2, \dots, N_2$ )로 분할하고 경계  $\Gamma$ 상의 유동점을  $(\zeta_j, \xi_j)$  고정점을  $(x_i, y_i)$ 로 나타내면,  $\varphi_s^{(1)}$ ,  $\varphi_L^{(2)}$  및  $\varphi_F^{(2)}$ 를 Green공식으로 표현한 식(2.36), 식(2.37) 및 식(2.38)의 경계적분방정식을 식(2.39)와 (2.40)를 이용하여 이산화하면 다음의  $N_2$  원 연립 1 차방정식을 얻는다.

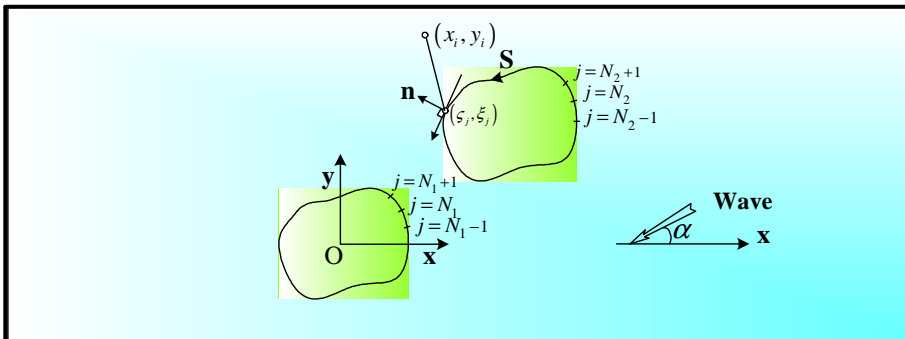


Fig. 2.3 Nodal points in numerical analysis.

$$\sum_{j=1}^{N_2} \left( \overline{G_{ij}^{(1)}} + \delta_{ij} \right) \varphi_S^{(1)}(\varsigma_j, \xi_j) = - \sum_{j=1}^{N_2} G_{ij}^{(1)} \frac{\partial}{\partial n} \varphi_I^{(1)}(\varsigma_j, \xi_j) \quad (i=1, 2, \dots, N_2) \quad (2.41)$$

$$\sum_{j=1}^{N_2} \left( \overline{G_{ij}^{(2k)}} + \delta_{ij} \right) \varphi_L^{(2)}(\varsigma_j, \xi_j) = - \sum_{j=1}^{N_2} G_{ij}^{(2k)} \frac{\partial}{\partial n} \varphi_L^{(2)}(\varsigma_j, \xi_j) \quad (i=1, 2, \dots, N_2) \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N_2} \left( \overline{G_{ij}^{(2)}} + \delta_{ij} \right) \varphi_F^{(2)}(\varsigma_j, \xi_j) = \\ - \sum_{j=1}^{N_2} G_{ij}^{(2)} \left[ \beta \left( \frac{\partial}{\partial n} \varphi_I^{(2)}(\varsigma_j, \xi_j) + \gamma \frac{\partial}{\partial n} \varphi_L^{(2)}(\varsigma_j, \xi_j) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.43)$$

$(i=1, 2, \dots, N_2)$

여기서,  $\delta_{ij}$  는 Kronecker delta 함수( $i=j$ 의 경우는 1,  $i \neq j$ 의 경우는 0)이며, 각 변수들은 다음의 식으로 주어진다.

$$G_{ij}^{(1)} = -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(k^{(1)} R_{ij}) \Delta S_j \quad (i \neq j)$$

$$G_{ii}^{(1)} = \frac{i}{\pi} \left( \wp - 1 + \text{Log} \frac{k^{(1)} \Delta S_i}{4} \right) \quad (i = j)$$

$$\begin{aligned} \overline{G_{ij}^{(1)}} &= \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(k^{(1)} R_{ij}) \right) \Delta S_j \\ &= \frac{i}{2} H_1^{(1)}(k^{(1)} R_{ij}) \left( \frac{\varsigma_j - \varsigma_i}{R_{ij}} \Delta \xi_j - \frac{\xi_j - \xi_i}{R_{ij}} \Delta \varsigma_j \right) \end{aligned} \quad (i \neq j)$$

$$\overline{G_{ii}^{(1)}} = 0 \quad (i = j)$$

$$G_{ij}^{(2k)} = -\frac{i}{2} H_0^{(1)}(2k^{(1)} R_{ij}) \Delta S_j \quad (i \neq j)$$

$$G_{ii}^{(2k)} = \frac{i}{\pi} \left( \wp - 1 + \text{Log} \frac{2k^{(1)} \Delta S_i}{4} - i \frac{\pi}{2} \right) \quad (i = j)$$

$$\begin{aligned} \overline{G_{ij}^{(2k)}} &= \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{i}{2} H_0^{(1)} \left( 2k^{(1)} R_{ij} \right) \right) \Delta S_j \\ &= \frac{i}{2} H_1^{(1)} \left( 2k^{(1)} R_{ij} \right) \left( \frac{\varsigma_j - \varsigma_i}{R_{ij}} \Delta \xi_j - \frac{\xi_j - \xi_i}{R_{ij}} \Delta \varsigma_j \right) \quad (i \neq j) \end{aligned}$$

$$\overline{G_{ii}^{(2k)}} = 0 \quad (i = j)$$

$$G_{ij}^{(2)} = -\frac{i}{2} H_0^{(1)} \left( k^{(2)} R_{ij} \right) \Delta S_j \quad (i \neq j)$$

$$G_{ii}^{(2)} = \frac{i}{\pi} \left( \wp - 1 + \text{Log} \frac{k^{(2)} \Delta S_i}{4} - i \frac{\pi}{2} \right) \quad (i = j)$$

$$\begin{aligned} \overline{G_{ij}^{(2)}} &= \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{i}{2} H_0^{(1)} \left( k^{(2)} R_{ij} \right) \right) \Delta S_j \\ &= \frac{i}{2} H_1^{(1)} \left( k^{(2)} R_{ij} \right) \left( \frac{\varsigma_j - \varsigma_i}{R_{ij}} \Delta \xi_j - \frac{\xi_j - \xi_i}{R_{ij}} \Delta \varsigma_j \right) \quad (i \neq j) \end{aligned}$$

$$\overline{G_{ii}^{(2)}} = 0 \quad (i = j)$$

$$\wp : 0.577216 \dots \quad \textit{Euler 정수}$$

$$R_{ij} = \sqrt{\left( \varsigma_j - \varsigma_i \right)^2 + \left( \xi_j - \xi_i \right)^2}$$

$$\frac{\partial \varphi_I^{(1)}}{\partial n} = \frac{\Delta \varsigma_j \sin \theta - \Delta \xi_j \cos \theta}{\Delta S_j} e^{-ik^{(1)}(\varsigma_j \cos \alpha + \xi_j \sin \alpha)}$$

$$\frac{\partial \varphi_I^{(2)}}{\partial n} = -\frac{3}{4} \lambda_0 \frac{\cosh 2k^{(1)} h}{\sinh^4 k^{(1)} h} e^{-i2k^{(1)}(\varsigma_j \cos \alpha + \xi_j \sin \alpha)} \times \left\{ \left( \frac{\Delta \xi_j \cos \alpha - \Delta \varsigma_j \sin \alpha}{\Delta S_j} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial x}{\partial n} = \frac{\Delta \varsigma_j}{\Delta S_j}$$

$$\frac{\partial y}{\partial n} = -\frac{\Delta \xi_j}{\Delta S_j}$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = -\frac{\Delta \varphi_{1j}}{\Delta S_j} \frac{\Delta \varsigma_j}{\Delta S_j}$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial y} = -\frac{\Delta \varphi_{1j}}{\Delta S_j} \frac{\Delta \xi_j}{\Delta S_j}$$

$$\Delta \varphi_{1j} = \frac{\varphi_1(\varsigma_{j+1}, \xi_{j+1}) - \varphi_1(\varsigma_{j-1}, \xi_{j-1})}{2}$$

$$\Delta S_j = \sqrt{(\Delta \varsigma_j)^2 + (\Delta \xi_j)^2}$$

$$\Delta \varsigma_j = \frac{(\varsigma_{j+1} - \varsigma_{j-1})}{2}$$

$$\Delta \xi_j = \frac{(\xi_{j+1} - \xi_{j-1})}{2}$$

### 2.2.7 수면파형

$\mathbf{O}(\varepsilon)$ ,  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 수면파형은 동역학적 자유수면 경계조건으로부터 구해지며,  $\mathbf{O}(\varepsilon)$ 의 수면파형은 다음과 같다.

$$\eta_1^{(1)} = i\varphi_1 \quad (2.44)$$

$\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 수면파형을 2배주파수성분과 시간에 관계없는 정상성분으로 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_2^{(2)} = 2i\{\varphi_F^{(2)} + \varphi_I^{(2)} + \varphi_L^{(2)}\} - \frac{1}{4k^{(1)}\lambda_0} \left\{ \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right)^2 \right\} - \frac{3\lambda_0}{4k^{(1)}} \varphi_1^2 \quad (2.45)$$

$$\eta_2^{(0)} = -\frac{1}{4k^{(1)}\lambda_0} \left\{ \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right|^2 \right\} - \frac{\lambda_0}{4k^{(1)}} |\varphi_1|^2 + Q_2 \quad (2.46)$$

### 2.2.8 파력

$x, y$ 방향의  $\mathbf{O}(\varepsilon)$ 의 파력은 각각 다음과 같이 나타내어진다.

$$F_x^{(1)} = i \oint_{\Gamma} \lambda_1 \varphi_1 dy \quad (2.47)$$

$$F_y^{(1)} = -i \oint_{\Gamma} \lambda_1 \varphi_1 dx \quad (2.48)$$

여기서,  $\lambda_1 = \frac{1}{k^{(1)}} \tanh k^{(1)} h$  이다.



$x, y$ 방향에 있어서  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 에 있어서 배주파수  $2\sigma$ 의 자유성분과 정상성분에 대한  
파력은 다음과 같이 주어진다.

$$F_{2x}^{(2)} = 2i \oint_{\Gamma} \left\{ \varphi_F^{(2)} \lambda_4 + \left( \varphi_I^{(2)} + \gamma \varphi_L^{(2)} \right) \lambda_2 + \varphi_I^{(2)} \lambda_5 \right\} dy \\ - \frac{1}{4k^{(1)} \lambda_0} \oint_{\Gamma} \left[ \left\{ \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right)^2 \right\} \lambda_2 + \varphi_1^2 \lambda_3 \right] dy - \frac{\lambda_0^2}{4(k^{(1)})^3} \oint_{\Gamma} \varphi_1^2 dy \quad (2.49)$$

$$F_{2y}^{(2)} = -2i \oint_{\Gamma} \left\{ \varphi_F^{(2)} \lambda_4 + \left( \varphi_I^{(2)} + \gamma \varphi_L^{(2)} \right) \lambda_2 + \varphi_I^{(2)} \lambda_5 \right\} dx \\ + \frac{1}{4k^{(1)} \lambda_0} \oint_{\Gamma} \left[ \left\{ \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right)^2 \right\} \lambda_2 + \varphi_1^2 \lambda_3 \right] dx + \frac{\lambda_0^2}{4(k^{(1)})^3} \oint_{\Gamma} \varphi_1^2 dx \quad (2.50)$$

$$F_{2x}^{(0)} = -\frac{1}{4k^{(1)} \lambda_0} \oint_{\Gamma} \left[ \left\{ \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right|^2 \right\} \lambda_2 + \varphi_1^2 \lambda_3 \right] dy + \frac{\lambda_0^2}{4(k^{(1)})^3} \oint_{\Gamma} |\varphi_1|^2 dy \quad (2.51)$$

$$F_{2y}^{(0)} = \frac{1}{4k^{(1)} \lambda_0} \oint_{\Gamma} \left[ \left\{ \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right|^2 \right\} \lambda_2 + \varphi_1^2 \lambda_3 \right] dx - \frac{\lambda_0^2}{4(k^{(1)})^3} \oint_{\Gamma} |\varphi_1|^2 dx \quad (2.52)$$

여기서,

$$\lambda_2 = \frac{1}{2k^{(1)}} \tanh k^{(1)} h \left( 1 + \frac{2k^{(1)} h}{\sinh 2k^{(1)} h} \right)$$

$$\lambda_3 = \frac{k^{(1)}}{2} \tanh k^{(1)} h \left( 1 - \frac{2k^{(1)} h}{\sinh 2k^{(1)} h} \right)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{k^{(2)}} \tanh k^{(2)} h$$

$$\lambda_5 = \frac{1}{2k^{(1)}} \tanh 2k^{(1)} h$$

### 3. 수치해석결과

#### 3.1 수치해석결과의 검증

파랑변형 및 파력에 있어서 본 수치해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 단수연직 원주구조물에 대한 파랑변형의 검증은 村上 등(1993)의 수치해석 및 수리실험결과와 본 해석결과를 비교하고, 단수 및 복수(2개)의 연직원주구조물에 대한 파력의 검증은 増田 등(1986)의 수치해석 및 수리실험결과와 비교하여 본 수치해석결과의 타당성을 검증한다.

Fig. 2.4는 단수연직원주구조물에 있어서 파가 입사각  $\alpha=0^\circ$ 로서 입사하는 경우에 있어서 단수연직원주구조물의 주변에 있어서 파고의 포락선을 나타낸 예로서, 그림 중에 윗 부분 및 아래 부분의 수치해석결과와 실험치는 원주표면에서 최대로 상승하는 무차원수면고  $\eta_{\max}/\eta_o$ 와 최대로 하강하는 무차원수면고  $\eta_{\min}/\eta_o$ 를 각각 나타낸다. 그림을 보면  $\theta \approx 0^\circ$ 에서 수면변동량이 제일 큰 값을 나타내고,  $\theta$ 가 증가함에 따라 수면변동량이 감소하며, 다시  $\theta \approx 135^\circ \sim 180^\circ$ 범위에서 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 수면의 변동과정에서 본 수치해석결과와 村上 등(1993)의 수치해석결과는 완전히 일치하고, 실험치는  $O(\epsilon^2)$ 의 수치해석결과에 잘 일치하는 경향을 나타낸다. 특히, 비선형성분은  $\theta \approx 0^\circ$ 와  $\theta \approx 180^\circ$ 인 구조물의 전후면에서 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.5는  $x$ ,  $y$ 축에 따른 무차원파고의 포락선을 나타낸 결과이다. 전체적으로 본 수치해석결과와 村上 등(1993)의 수치해석결과는 완전히 일치하고, 실험치는  $O(\epsilon)$  보다는  $O(\epsilon^2)$ 의 수치해석결과에 더 근접함을 알 수 있다.  $x$ ,  $y$ 축을 따른 수면변동량의 차이를 살펴보면  $y$ 축에 따른 변화량은 회절산란파가 매우 작기 때문에 수면변동량이 작게 나타나며,  $x$ 축의 변화량은 원주표면에서 가장 큰 값을 나타내고, 거리가 증가함에 따라 최소 및 최대치가 반복적으로 나타난다. 이의 변화는 구조물에 의해 반사되는 회절산란파와 입사파의 중첩에 의한 중복파랑의 발생에 의한 것으로, 이는 구조물로부터 거리가 멀어짐에 따라 파랑에너지의 수평분산에 의해 수면변동량이 작아져 무한원방에서는 입사파랑의 경우에 접근하게 된다.

Fig. 2.6은 Haskind법을 사용한 増田 등(1986)의 수치해석결과 및 수리실험결과와 본 수치해석결과를 비교한 것으로, 무차원최대파력은  $k^{(1)}a \approx 0.45$ 에서 발생하고  $k^{(1)}a$ 가 증가함

에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 때, 본 수치해석결과와 増田 등(1986)의 수치해석결과는 동일한 변화과정을 나타내고 있지만,  $k^{(1)}a \geq 0.7$ 의 범위에서 본 비선형수치해석결과와 増田 등(1986)의 결과는 약간 상이한 값을 나타내며, 특히  $k^{(1)}a$ 가 커짐에 따라 결과의 차이도 크게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 수치해석법의 차이로 인한 결과로 판단되지만, 본 수치해석결과가 보다 실험치에 근접하고 있기 때문에 본 해법이 보다 정도 높은 수치해법으로 판단된다. 특히, 増田 등(1986)이 적용하고 있는 Haskind법 으로서는 파랑변형을 해석할 수 없는 한계가 있다.

이상과 같이 연직원주구조물에 대해 파랑변형과 파력에 있어서 기존의 수치해석결과 및 실험결과와 본 수치해석결과와의 비교로부터 본 해석법의 타당성을 충분히 검증할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 이를 근거로 하여 Goda(1983)가 제시한 비선형파라미터에 의한 원형, 정사각형, 직사각형 단면의 연직주상구조물에 대한 비선형파력 및 비선형파랑변형을 검토하는 것으로 한다.

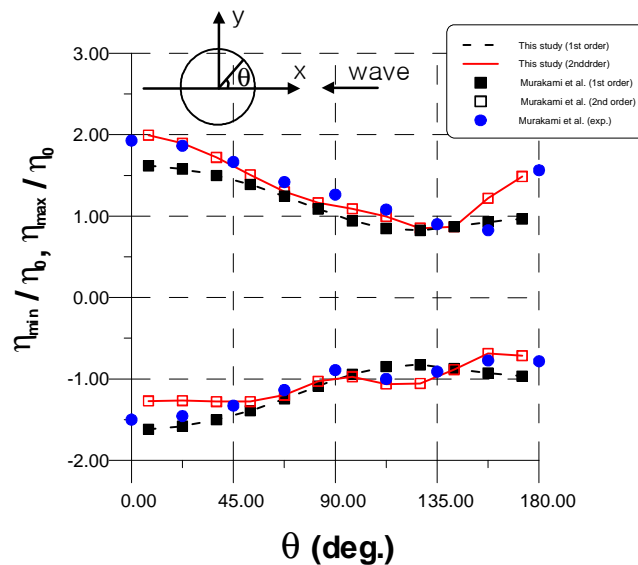


Fig. 2.4 Wave maximum runup and minimum rundown envelopes around circular column

( $k^{(1)}h=1.4, k^{(1)}H=0.305, a/h=0.463, \alpha=0^\circ$ ).

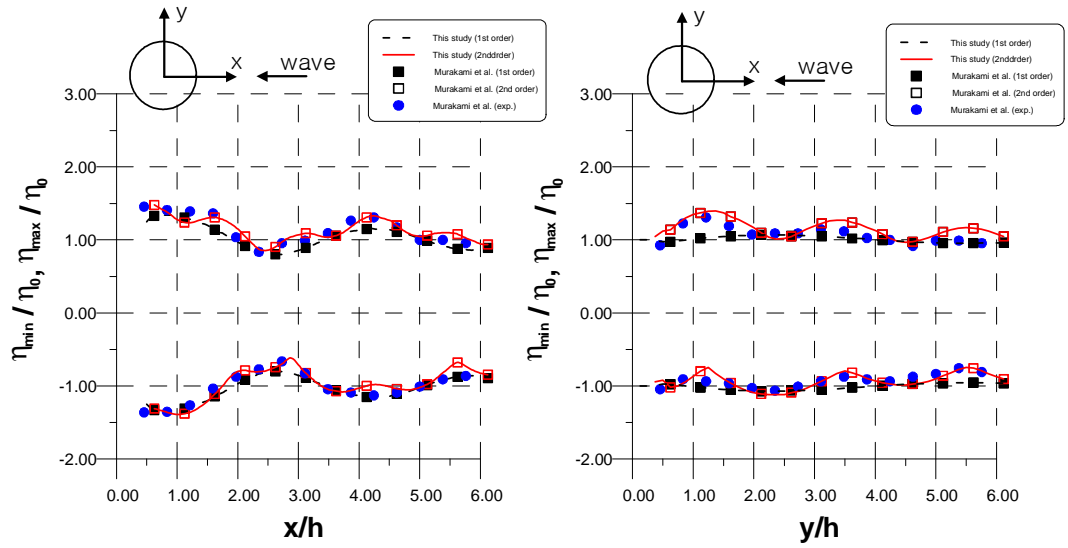


Fig. 2.5 Wave maximum runup and minimum rundown envelopes along x and y axes

$$(k^{(1)}h=1.0, k^{(1)}H=0.162, a/h=0.463, \alpha=0^\circ)$$

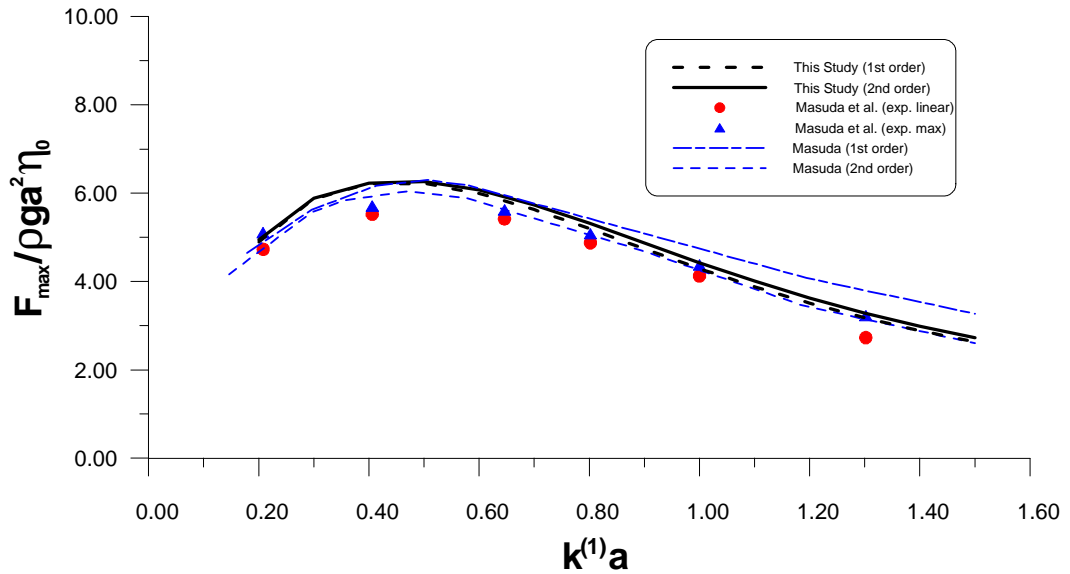


Fig. 2.6 Wave forces acting on a circular column( $h/a=5.0, H/a=0.25$ )

## 3.2 수치해석결과

### 3.2.1 비선형파랑변형

#### (1) 단수연직주상구조물

Fig. 2.7은  $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\alpha=0^\circ$ 의 경우에 Goda(1983)가 제시한 비선형파라미터 ( $\Pi = (H/L) \coth^3(k^{(1)}h)$ ,  $L$ 은 입사파의 파장)의 변화에 따른 단수연직원주구조물의 표면둘레에 따른 최대수면상승고의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 2.7(a)와 Fig. 2.7(b)는 비선형파라미터  $\Pi$ 가 각각 0.06, 0.03의 경우에 대한 것으로, 가는 파선은 평균수면( $O(\varepsilon^2)$ 의 정상성분), 가는 실선은  $O(\varepsilon)$ 의 성분, 굵은 파선은  $O(\varepsilon^2)$ 의 2배주파수성분  $O(\varepsilon^2)$ 의 자유파성분과 구속파성분의 합을 나타내며, 굵은 실선은  $O(\varepsilon)$ 의 성분과  $O(\varepsilon^2)$ 의 성분을 합한 전체최대수면상승고를 각각 나타낸다. Fig. 2.7(a)의  $\Pi=0.06$ 인 경우에  $O(\varepsilon)$  성분은  $\theta$ 의 위치에 따라 회절파의 주기가 다르며, 이 회절파와 입사파의 위상중복에 의해 구조물의 전면( $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ )에서 가장 큰 값을 나타내고,  $\theta$ 가 증가함에 따라 점차 감소하다가 구조물의 후면( $\theta \approx 180^\circ$ )에서 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

$O(\varepsilon^2)$ 의 정상성분을 나타내는 평균수면은  $\theta$ 의 변화에 따라 구조물의 전면인  $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ 와  $\theta \approx 110^\circ, 180^\circ, 250^\circ$ 에서 극대치를,  $\theta \approx 70^\circ, 145^\circ, 215^\circ, 290^\circ$ 에서 최소치를 나타내지만, 그의 변동은 매우 적고 전체적으로 0에 가까운 거의 일정한 분포를 나타낸다. 여기서, 일반적으로 중복파의 Anti-node 부근에서 평균수위는 상승하고, Node 부근에서 평균수위가 하강하는 현상을 3차원파동장에서도 확인할 수 있다. 즉,  $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ 에서는 중복파의 Anti-node에 상응하므로 평균수위가 상승하고, Node에 상응하는 구조물 후면의  $\theta \approx 145^\circ, 215^\circ$ 에서 하강하는 것을 알 수 있다.  $O(\varepsilon^2)$ 의 2배주파수성분은  $\theta$ 가 증가함에 따라 극소 및 극대가 교차로 나타나지만,  $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ 에서 가장 큰 값을, 그리고  $\theta \approx 180^\circ$ 에서 가장 적은 값을 나타낸다. 여기서,  $O(\varepsilon^2)$ 의  $2\sigma$ 성분에는 자유파성분 및  $O(\varepsilon)$ 의 비선형간섭에 의해 발생하는 구속파성분이 함께 포함되어 있다. 따라서,  $O(\varepsilon)$ 의 성분의 변화와 동일한 경향을 나타내는 결과는 주로 구속파성분에 의한 것으로 판단되고,  $\theta \approx 180^\circ$ 근방에서와 같이  $O(\varepsilon)$  성분이 증가하지만  $O(\varepsilon^2)$ 의 값이 감소하는 경향은 자유

파성분에 의한 것으로 판단된다.  $O(\epsilon) + O(\epsilon^2)$  인 전체최대수면상승고의 전체적인 파고변화는  $O(\epsilon)$  의 변화와 거의 같으나, 비선형성분인  $O(\epsilon^2)$  의 정상성분과  $O(\epsilon^2)$  의 2배주파수성분이 구조물의 전면( $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ )에서 가장 크게 나타남에 따라 전체최대수면상승고도 구조물의 전면에서  $O(\epsilon)$  의 성분보다 가장 큰 차이를 나타내며, 구조물의 배후로 감에 따라 그 차이가 점점 작아지지만, 전체적으로  $O(\epsilon^2)$  의 결과가  $O(\epsilon)$  보다 항상 큰 결과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.7(b)의  $\Pi=0.03$ 인 경우에는 전술한 Fig. 2.7(a)와 동일한 변화경향을 나타내지만, 각 성분의 변화치는 매우 적다는 것을 알 수 있다. 따라서, 비선형파라미터  $\Pi$ 가 클수록 비선형성의 커지고, 특히 구조물의 전면  $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ 에 있어서 비선형성분이 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 2.8은  $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.1$ ,  $\alpha=0^\circ$ 의 경우에 단수연직원주구조물의 주변에 있어서 무차원등최대수면상승고를 나타낸 것으로, Fig. 2.8(a)는 선형이론, Fig. 2.8(b)는 비선형이론에 의한 결과이다. 구조물의 전면에서 입사파랑이 구조물에 의해 가장 크게 회절반사되기 때문에 입사파와의 중첩에 의한 부분중복파가 형성되어 가장 큰 수면상승을 나타내며, 이는 구조물로부터 멀어짐에 따라 에너지의 수평분산에 의해 점점 작아지는 경향을 나타낸다. Fig. 2.8(b)의 비선형경우에 있어서는 Fig. 2.8(a)의 선형이론의 경우에 비해 구조물의 전면에서 비선형성분에 의해 보다 높은 수면상승을 나타내고, 후면에 복잡한 파동장이 형성되며, 또한 중복파의 Node 부근의 수면이 상승되어 선형결과보다 평탄하게 되어 있고, Anti-node 부근에서 수면이 솟아오르는 형상으로 된다는 것을 알 수 있다.

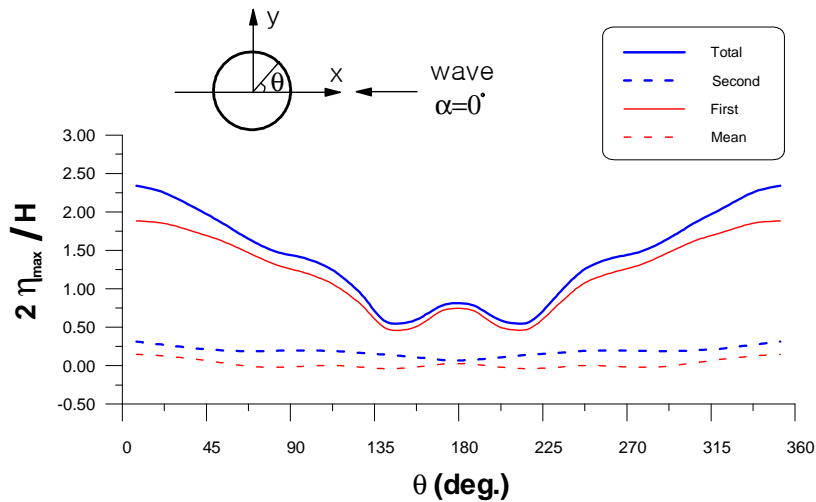
Fig. 2.9은 Fig. 2.8과 동일한 조건에서 무차원최대수면상승고의 공간분포를 나타낸 경우로, Fig. 2.9(a)는 선형이론, Fig. 2.9(b)는 비선형이론에 의한 결과이다. 이로부터 Fig. 2.8에서 언급한 형상을 보다 쉽게 파악할 수 있으며, 또한 구조물의 후면에 있어서 비선형성분에 의한 파동장의 복잡한 변화를 쉽게 알 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 2.10~Fig. 2.13은  $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.1$ ,  $\alpha=0^\circ$ 의 경우에 각각 정사각형과 직사각형의 단면형상에 대한 무차원등최대수면상승고 및 공간분포를 나타낸 것으로, 각각의 경우에 있어서 (a)가 선형이론, (b)가 비선형이론에 의한 결과를 나타낸다.

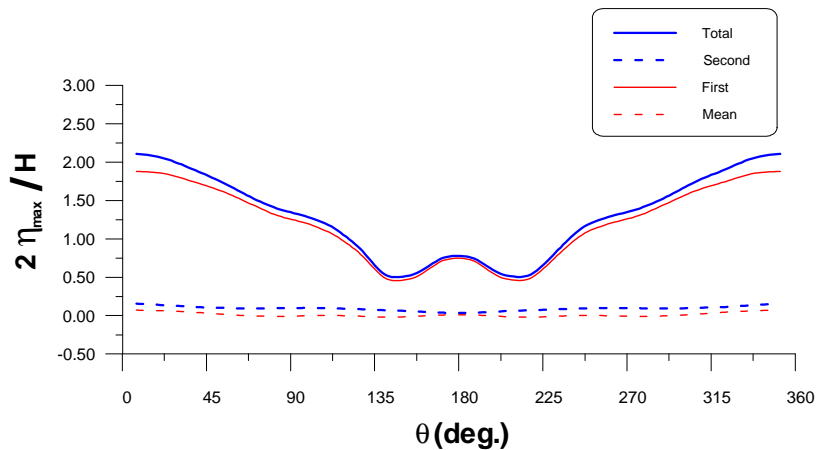
정사각형인 Fig. 2.10과 Fig. 2.11의 경우와 원형인 Fig. 2.8과 Fig. 2.9의 경우를 비교하면 단면형상이 정사각형인 경우는 우각부의 주위에서 파의 회절산란이 복잡하게 형

성되어 단면형상이 원형인 경우와는 약간 상이한 분포를 나타내지만, 선형 및 비선형결과 모두 전체적인 파동장의 변화는 거의 동일한 분포를 나타낸다.

직사각형인 Fig. 2.12와 Fig. 2.13의 경우에는 입사파방향의 투영면적이 Fig. 2.8과 Fig. 2.9의 원형단면 및 Fig. 2.10과 Fig. 2.11의 정사각형단면에 비해 작아서 구조물의 전면에서 최대수면상승고는 원형단면에 비해서 작게 나타나고, 또한 구조물의 배후에서도 작게 나타날 뿐만 아니라, 구조물의 후면에서의 전체적인 파동장의 변화양상도 원형 및 정사각형단면에 비해 상이한 것을 알 수 있다.



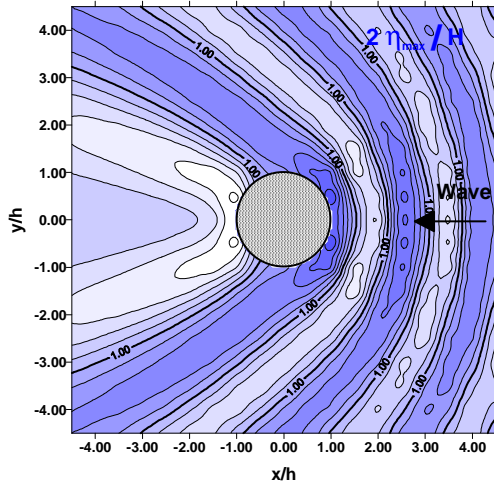
(a)  $\Pi=0.06$



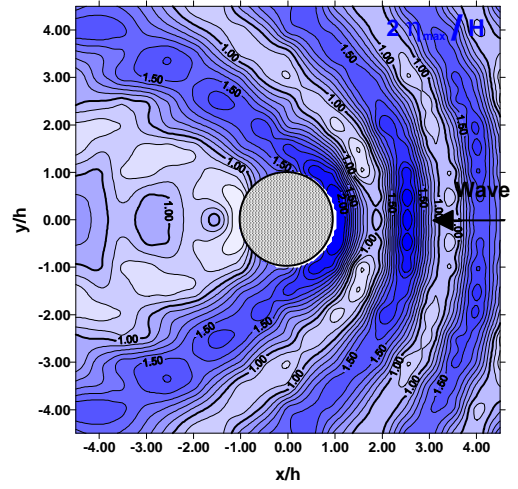
(b)  $\Pi=0.03$

Fig. 2.7 Maximum wave runup envelopes around a vertical circular column

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \alpha=0^\circ).$$

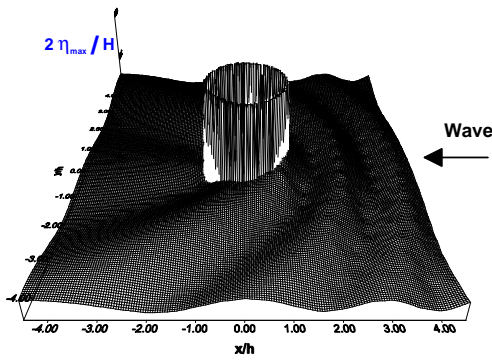


(a) Linear theory

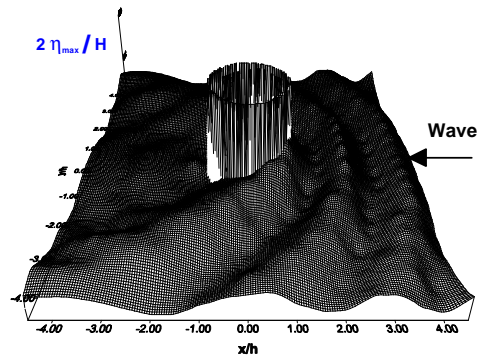


(b) Second order theory

Fig. 2.8 Contours of the maximum rising water level near a vertical circular column  
( $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.1$ ,  $\alpha=0^\circ$ ).



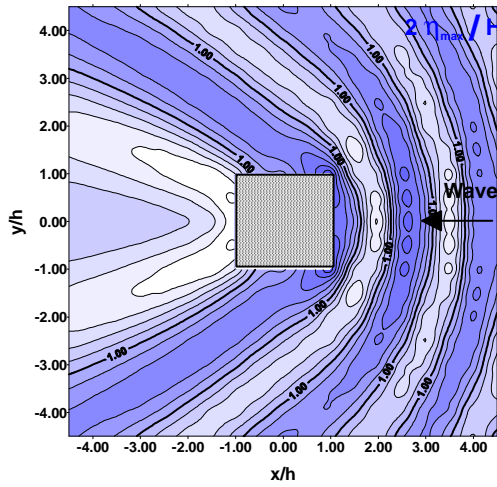
(a) Linear theory



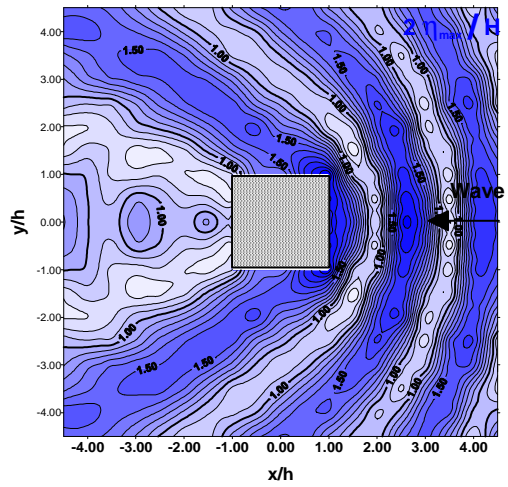
(b) Second order theory

Fig. 2.9 Oblique view of the maximum rising water level near a vertical circular column  
( $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.1$ ,  $\alpha=0^\circ$ ).





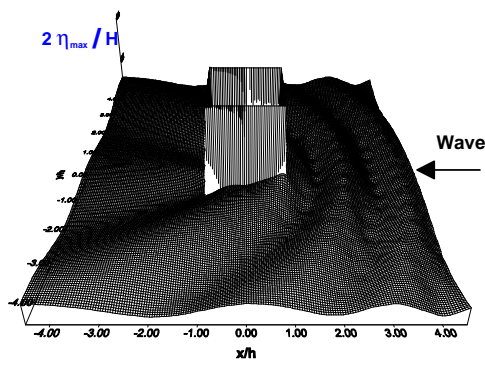
(a) Linear theory



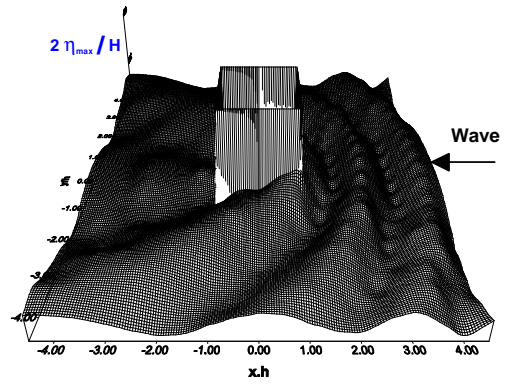
(b) Second order theory

Fig. 2.10 Contours of the maximum rising water level near a vertical square column

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ).$$



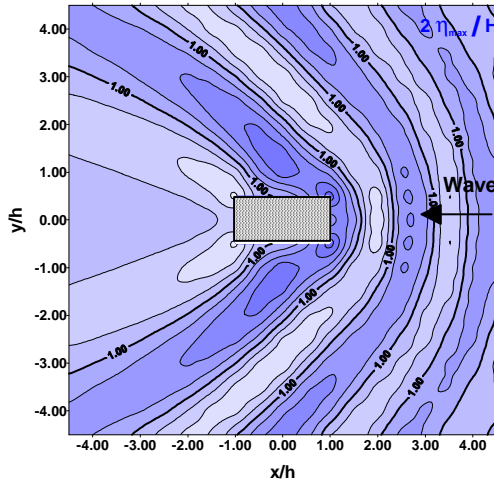
(a) Linear theory



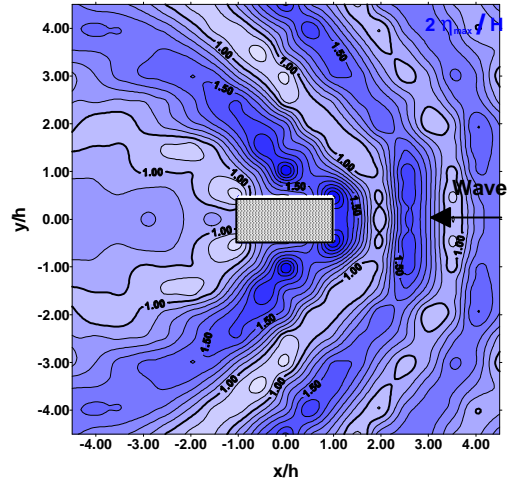
(b) Second order theory

Fig. 2.11 Oblique view of the maximum rising water level near a vertical square column

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ).$$

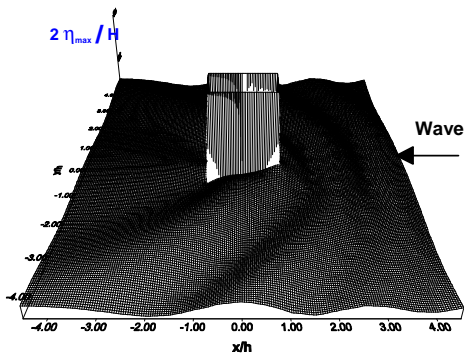


(a) Linear theory

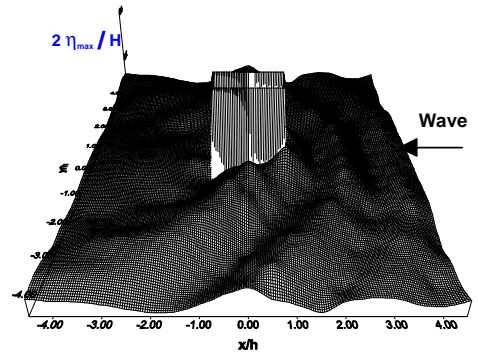


(b) Second order theory

Fig. 2.12 Contours of the maximum rising water level near a vertical rectangular column  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ .



(a) Linear theory

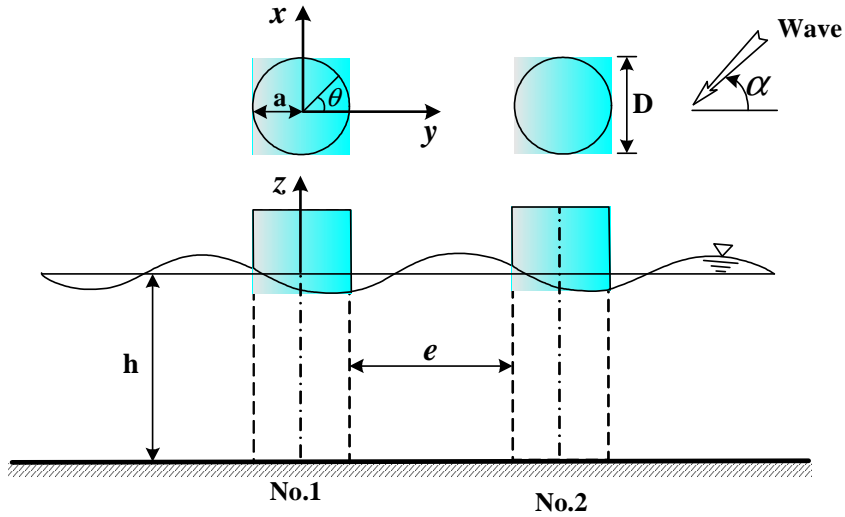


(b) Second order theory

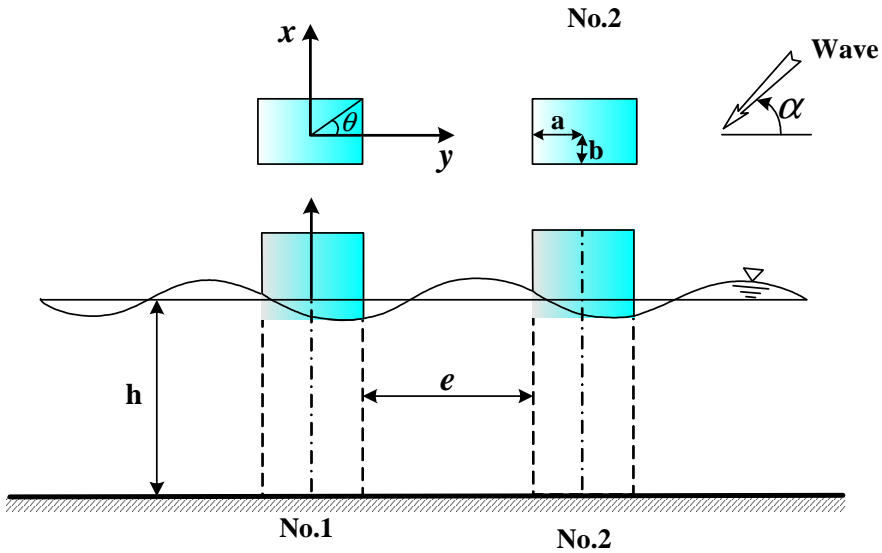
Fig. 2.13 Oblique view of the maximum rising water level near a vertical rectangular column  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.1, \alpha=0^\circ)$ .

## (2) 복수(2 개)연직주상구조물

Fig. 2.15 및 Fig. 2.16는  $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.03$ 의 경우에 Fig. 2.14(a)에서 나타내는 반경  $a$ 인 원형단면을 가진 2개의 복수연직주상구조물에 대해서 그 간격을 각각 직경의 1 배와 2배로 배치하였을 때 파의 입사각  $\alpha=0^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 경우에 구조물 표면둘레에 따른 최대수면상승고의 변화를 나타낸 수치해석의 결과이다.



(a) Two circular columns



(b) Two rectangular columns

Fig. 2.14 Calculating condition of two vertical columns.

구조물의 배치간격  $e/D$ 의 변화에 따른 구조물 1에서 최대수면상승고의 변화를 나타내는 Fig. 2.15(a)와 Fig. 2.15(b)에 있어서 모두 파가 입사해 오는 구조물의 전면 ( $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ )에서 가장 높은 수면상승을 나타내고,  $\theta$ 의 변화에 따라 점점 감소하는 경향을 나타내다가 구조물의 후면  $\theta \approx 180^\circ$ 부근에서 증가하는 경향을 나타내지만, 구조물의 전면 ( $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ )에 있어서 비선형성분은 구조물 사이의 간격  $e/D=1.0$ 인 Fig. 2.15(a)의 경우가  $e/D=2.0$ 인 Fig. 2.15(b)의 경우보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 파가 입사해 오는 방향의 전면에 위치한 구조물 2의 경우에 대한 최대수면상승고의 변화는 구조물의 전면 ( $\theta \approx 0^\circ(360^\circ)$ )에서 구조물 1에 비해 큰 최대수면상승고를 나타내고,  $\theta$ 의 변화에 따른 변화도 구조물 1에 의한 회절산란파의 영향으로 복잡하게 나타난다. 또한, 배치간격이 상대적으로 좁은 Fig. 2.15(c)의 경우가 Fig. 2.15(d)의 경우에 비해 비선형성분이 크게 나타나고, 수면상승량의 변화도 복잡하게 형성된다. 따라서, 구조물이 근접하게 설치되면 구조물에 의해 발생하는 회절산란파가 서로 큰 값으로 중첩됨으로 인해 복잡한 중복파동장이 형성됨을 알 수 있으며, 더욱이 파의 비선형성분은 구조물간의 간격이 근접할수록 더욱 커지고, 구조물간의 간격이 넓어질수록 단수원주구조물의 경우에 접근할 것으로 예상된다. 여기서,  $\theta$ 의 변화에 따른 비선형성분의 변화양상을 살펴보면, 앞에서 언급한 단일원주에 대한 Fig. 2.7의 경우와 동일한 경향을 나타내지만, 구조물 2의 Fig. 2.15(c)의 경우는 그의 변화치가 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기본적으로  $O(\epsilon)$ 의 수면변동이 파와 구조물간의 상호간섭이 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

Fig. 2.16은  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 있어서 구조물 1과 2의 표면둘레에 따른 무차원최대수면상승고를 나타낸 것으로, 각각의 그림에서 (a), (b), (c), (d)의 조건은 전술된 Fig. 2.15와 같다. Fig 2.16(a)에서 구조물 1의 표면둘레에 따른 최대수면상승고의 변화는  $\theta$ 에 따라 점점 증가하다가  $\theta \approx 90^\circ$ 부근에서 가장 큰 최대수면상승고가 나타나고, 다시  $\theta$ 가 증가함에 따라 점점 감소하다가  $\theta \approx 250^\circ$ 에서 최소치를 나타내며,  $\theta \approx 360^\circ$ 까지 증가와 감소를 반복하면서 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 2.16(b)의 경우는 Fig. 2.16(a)와 비슷한 경향을 나타내지만, 최대치를 나타내는  $\theta$  값은 보다 작고, 최소치를 나타내는  $\theta$ 의 값은 보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 구조물 2의 경우에도  $\theta$ 의 변화에 따라 동일한 경향을 나타내지만, 최대 및 최소치가 발생하는  $\theta$ 의 값이 구조물의 배치간격에 따라 변

화되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 구조물의 배치간격에 따라 구조물에 미치는 회절산란파의 크기와 영향이 상이하기 때문이다. Fig. 2.16에서 비선형성분의 영향이 가장 크게 나타나는 곳은 각각 가장 큰 최대수면상승고가 나타나는  $\theta \approx 90^\circ$ (Fig. 2.16(a)),  $\theta \approx 45^\circ$ (Fig. 2.16(b)),  $\theta \approx 90^\circ$ (Fig. 2.16(c)),  $\theta \approx 135^\circ$ (Fig. 2.16(d))에서 비선형성분의 영향이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 특히, Fig. 2.16(a), Fig. 2.16(c)에 있어서는  $\mathbf{O}(\varepsilon)$ 의 최대수면상승고가 발생하는 곳은 각각  $\theta \approx 70^\circ$ ,  $\theta \approx 110^\circ$ 부근에서 발생하나,  $\mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 정상성분과 2배주파수성분의 영향으로  $\mathbf{O}(\varepsilon) + \mathbf{O}(\varepsilon^2)$ 의 최대수면상승고는  $\theta \approx 90^\circ$ 에서 발생한다. 또한, 단수연직원주구조물에 있어서는 파가 입사해 오는 구조물의 전면에서 가장 큰 최대수면상승고가 나타나지만, 이와는 달리 Fig. 2.16(b), Fig. 2.16(d)의 경우와 같이 파가 입사해 오는 구조물의 전면인  $\theta \approx 90^\circ$ 부근에서 최대수면상승고가 나타나지 않는 것은 구조물의 상호작용에 의한 회절산란파의 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 2.17과 Fig. 2.18은  $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.06$ ,  $e/D=1.0$ 에 대해 파의 입사각이  $\alpha=0^\circ$ 로서 입사하는 경우에 Fig. 2.14(a)와 같이 배치된 복수(2개)연직원주구조물의 주변에 있어서 무차원등최대수면상승고 및 공간분포를 나타낸 것으로서, 각각의 그림에서 (a)는 선형이론, (b)는 비선형이론에 의한 결과를 나타낸다. Fig. 2.17과 Fig. 2.18에서 구조물 1의 경우에 구조물의 전면에서 가장 큰 최대수면상승고를 나타내지만, 구조물 2의 경우에는 구조물의 전후면에서 비슷한 크기의 최대수면상승고를 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같이 구조물 1과는 달리 구조물 2의 후면에서도 큰 최대수면상승고가 형성되는 것은 구조물 1과 2에 의한 발생한 회절산란파의 중복에 의한 것으로, 배치된 구조물의 간격이 좁을수록 이의 영향은 더욱 커질 것으로 판단되어진다. 전체적으로는 비선형이론의 결과는 선형이론에 비해 구조물의 전면과 후면에서 최대수면상승고가 크게 나타나고, 구조물의 측면에서도 비선형성의 영향으로 인해 회절산란되는 형상이 복잡하게 나타난다.

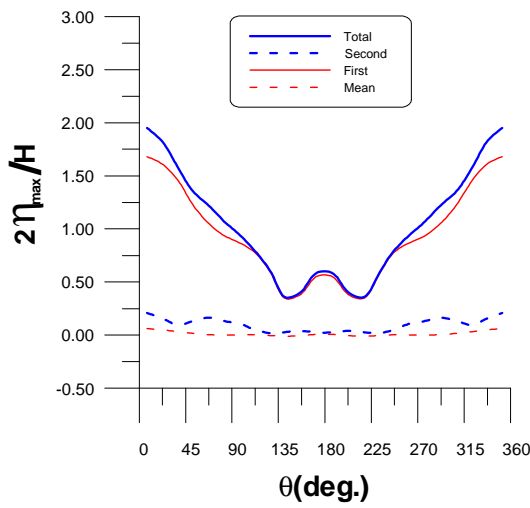
Fig. 2.19 및 Fig. 2.20은 Fig. 2.14(a)와 같이 배치된 복수(2개)연직원주구조물에 있어서 입사파향  $\alpha=90^\circ$ 의 경우이고, 입사파랑의 제원은 Fig. 2.17 및 Fig. 2.18과 동일하다. 각각의 그림에서 파가 입사하는 방향에 대해 구조물 1과 2가 대칭이므로 최대수면상승고의 공간분포도 좌우대칭으로 되어 있으며, 파가 입사하는 방향인 구조물의 전면에서 가장 큰 최대수면상승고가 나타난다. 비선형이론의 결과에서는 구조물이 마주보는 안쪽 측면에서도 구조물의 전면과 비슷한 크기의 최대수면상승고가 나타나며, 구조물의 전면

에서도 선형이론의 결과에 비해 큰 값을 나타내고, 구조물의 후면 및 측면에서도 비선형성의 영향으로 파동장이 복잡하게 형성된다.

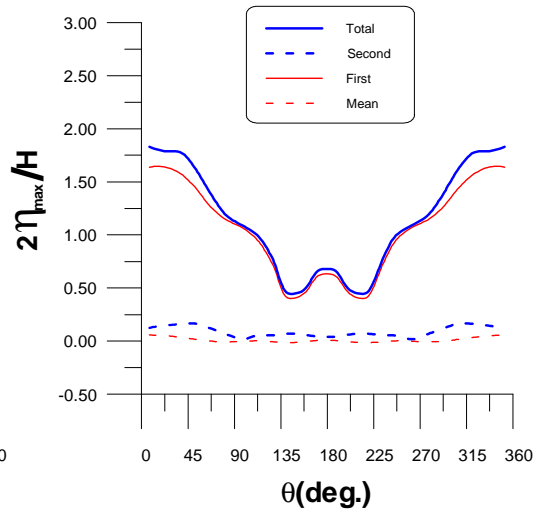
Fig. 2.21과 Fig. 2.22 및 Fig. 2.23와 Fig. 2.24는 Fig. 2.14(b)와 같이 배치된 직사각형단면의 복수(2개)연직구조물에 대해서 무차원등최대수면상승고와 공간분포를 나타낸 것이다. 여기서, 파랑제원은 전술한 복수(2개)연직원주구조물의 경우와 동일하다.

먼저, 파향입사각  $\alpha=0^\circ$ 인 Fig. 2.21과 Fig. 2.22의 경우를 살펴보면 파향방향으로 투영면적이 작기 때문에 이로 인한 회절산란이 적으므로 구조물의 전면에서 최대수면상승고가 원주의 경우보다 적다는 것을 알 수 있다. 또한, 회절산란파가 적기 때문에 이와 입사파랑과의 비선형간섭은 작아져 비선형해석결과와 선형해석결과와의 차이가 크게 나타나지 않지만, 구조물 2의 전면과 후면, 그리고 구조물 1의 후면 등에서는 비선형해석결과가 큰 값을 나타내고, 파동장의 변화도 다소 복잡하게 형성된다는 것을 알 수 있다.

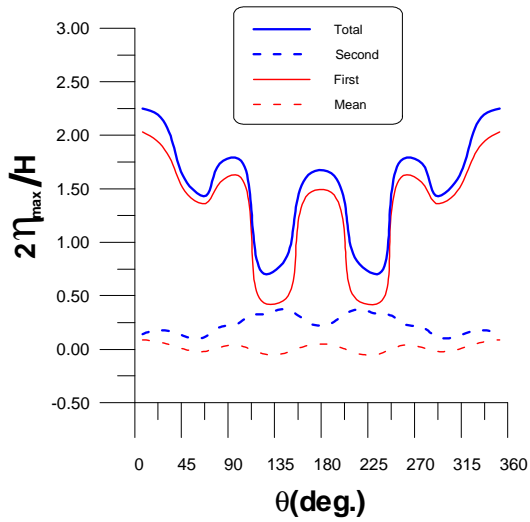
$\alpha=90^\circ$ 인 Fig. 2.23과 Fig. 2.24는 앞에서 언급된 Fig. 2.19과 Fig. 2.20의 복수(2개)연직원주구조물의 경우와 전체적으로 비슷한 무차원등최대수면상승고와 공간분포를 나타낸다. 그러나, 직사각형의 경우는 반사파의 반사위상이 동일하고, 반면에 원형의 경우는 상이하기 때문에 직사각형의 전면에서 형성되는 파봉이 원형의 경우보다 구조물의 각 단면 중심에 놓이고, 수면상승고도 크며, 또한 그의 분포범위도 넓다는 것을 알 수 있다. 더욱이 비선형해석결과에서는 이와 같은 경향을 정확히 알 수 있으며, 특히 구조물의 전면에서 수면상승고의 크기와 범위가 원형의 경우보다 상당히 크다는 것을 알 수 있다.



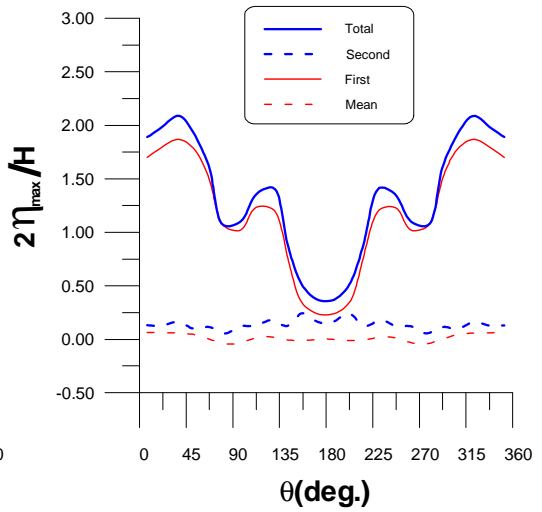
(a) No.1 cylinder,  $e/D=1.0$



(b) No.1 cylinder,  $e/D=2.0$



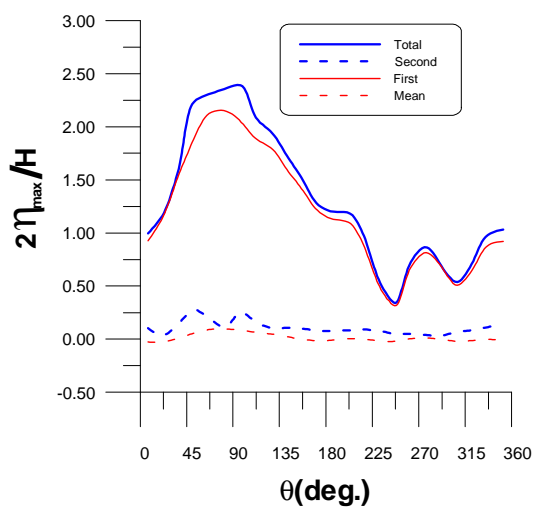
(c) No.2 cylinder,  $e/D=1.0$



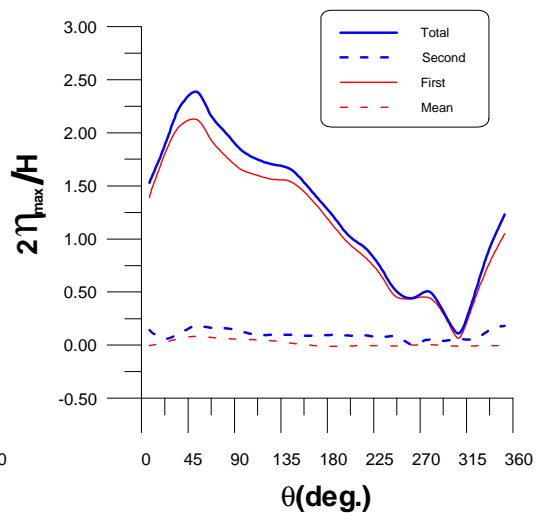
(d) No.4 cylinder,  $e/D=2.0$

Fig. 2.15 Maximum wave runup envelopes around two vertical circular columns

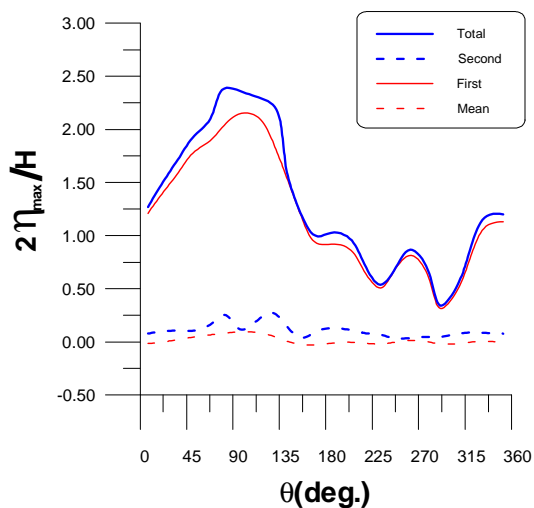
( $k^{(1)}h=2.0$ ,  $h/a=1.0$ ,  $\Pi=0.03$ ,  $\alpha=0^\circ$ ).



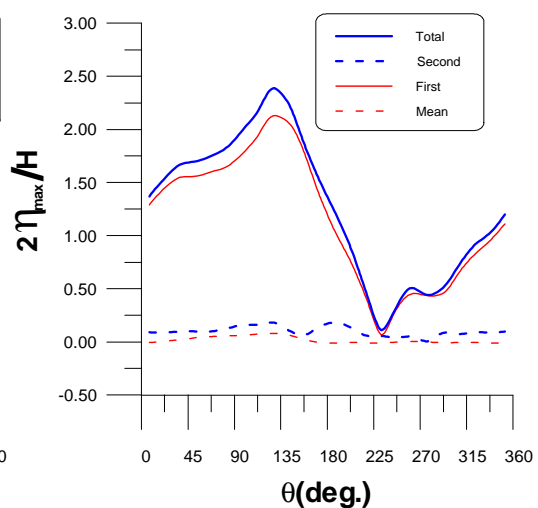
(a) No.1 cylinder,  $e/D=1.0$



(b) No.1 cylinder,  $e/D=2.0$



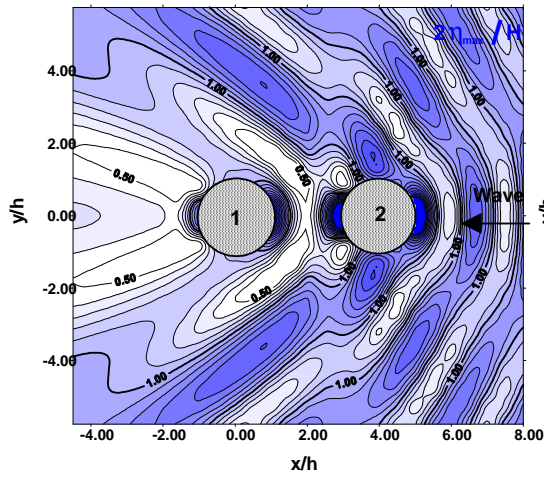
(c) No.2 cylinder,  $e/D=1.0$



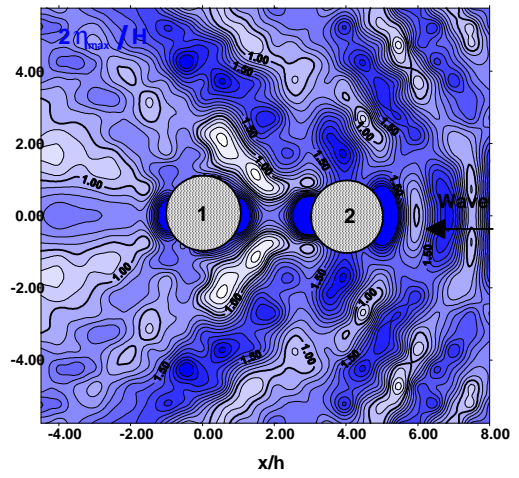
(d) No.4 cylinder,  $e/D=2.0$

Fig. 2.16 Maximum wave runup envelopes around two vertical circular columns  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.03, \alpha=90^\circ)$ .



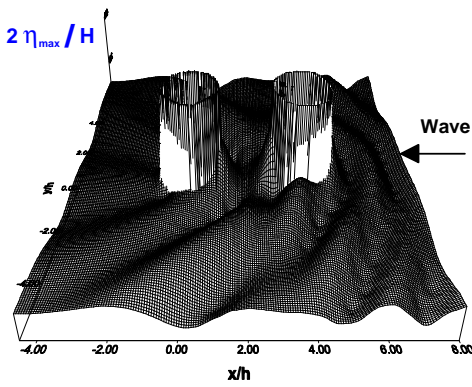


(a) Linear theory

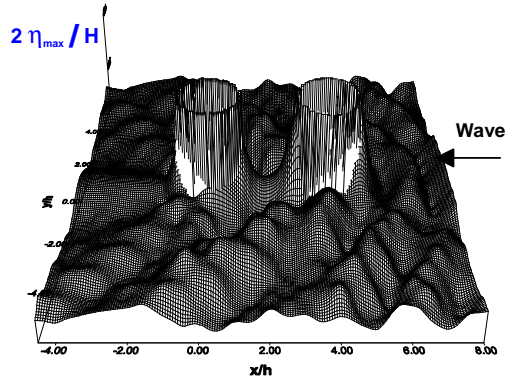


(b) Second order theory

Fig. 2.17 Contours of the maximum rising water level near two vertical circular columns  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ)$ .



(a) Linear theory



(b) Second order theory

Fig. 2.18 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical circular columns  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ)$ .

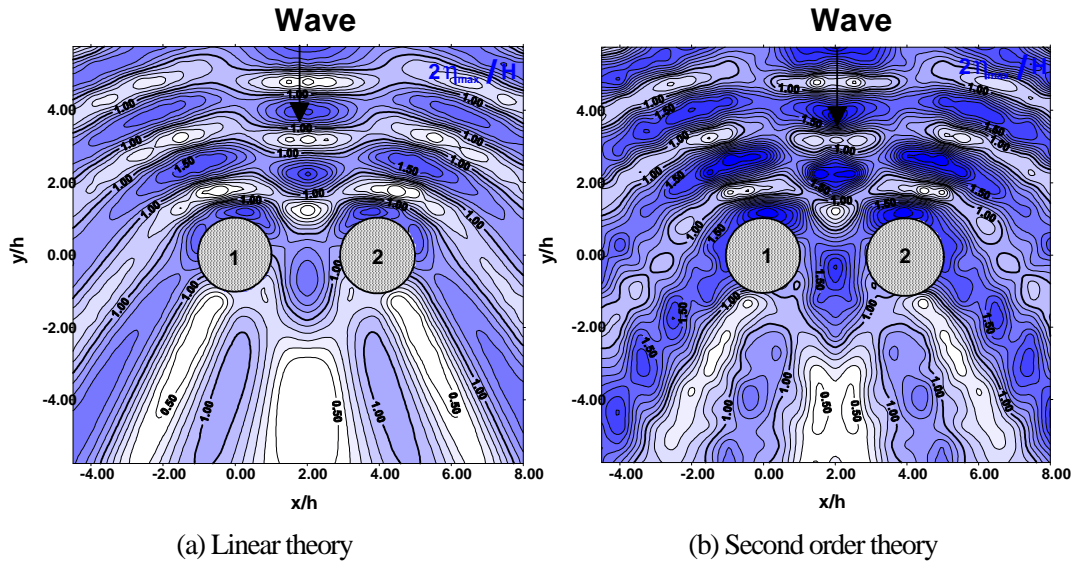


Fig. 2.19 Contours of the maximum rising water level near two vertical circular columns  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=90^\circ)$ .

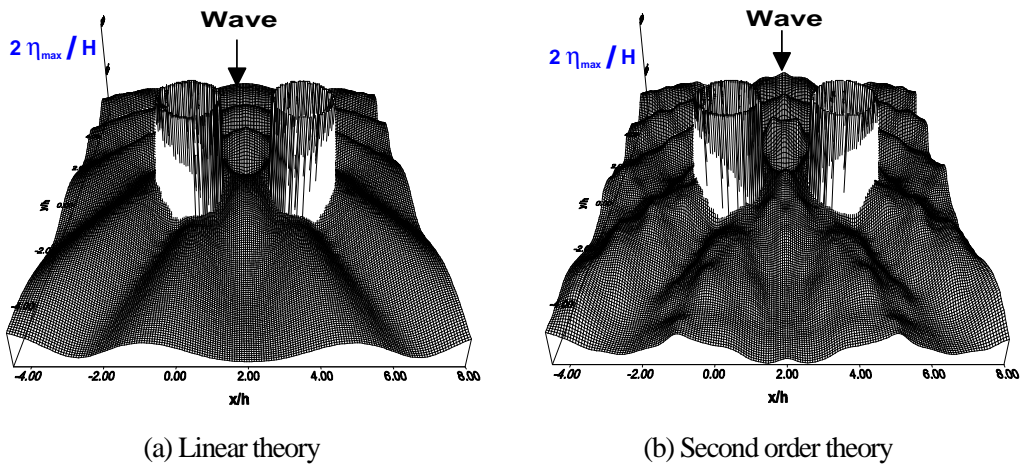
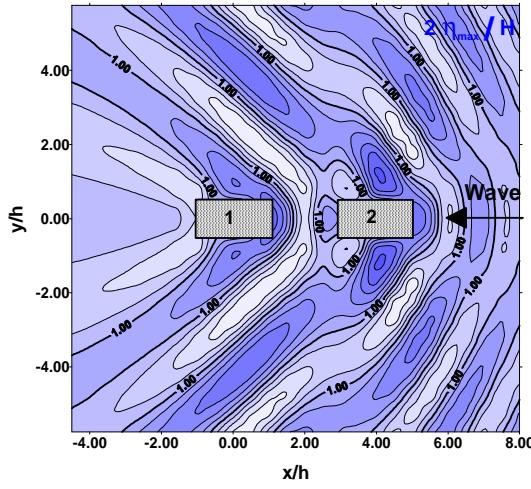
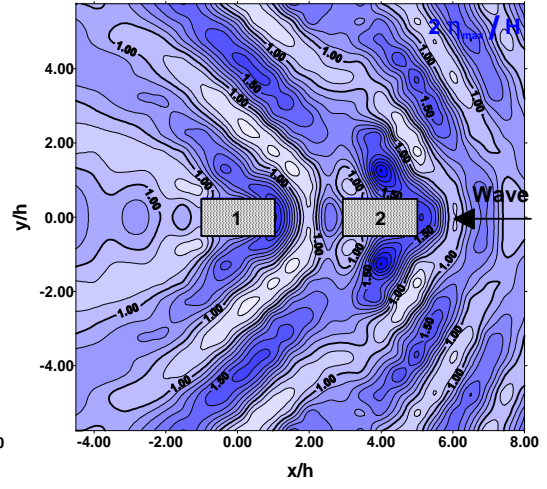


Fig. 2.20 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical circular columns  
 $(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=90^\circ)$ .



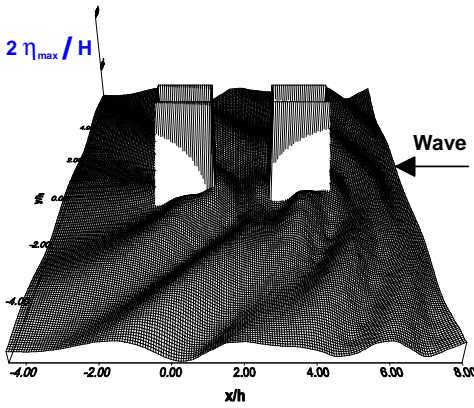
(a) Linear theory



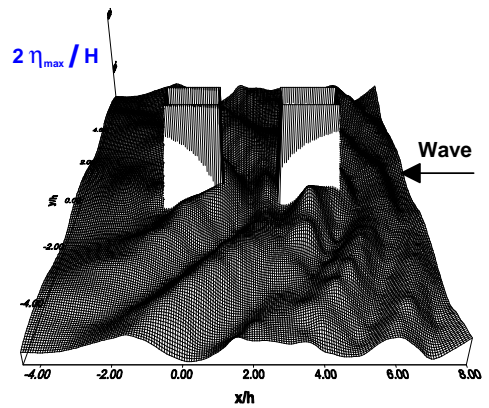
(b) Second order theory

Fig. 2.21 Contours of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ).$$



(a) Linear theory

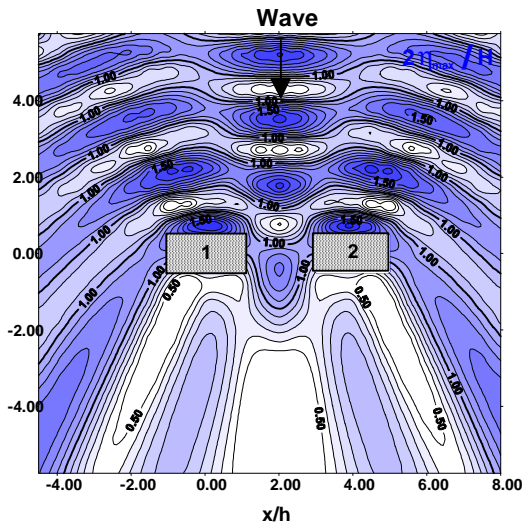


(b) Second order theory

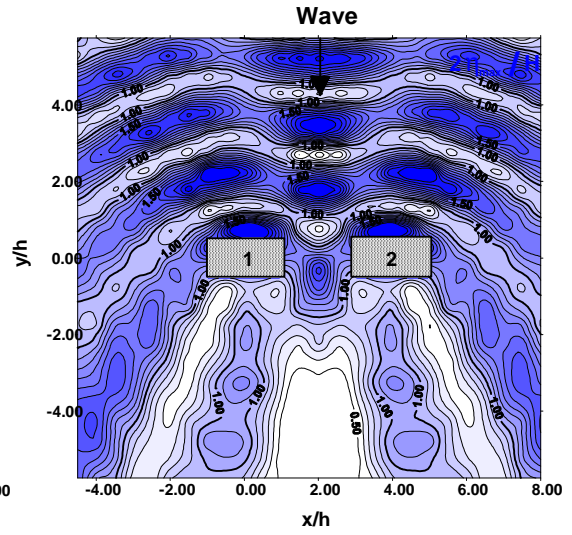
Fig. 2.22 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=0^\circ).$$





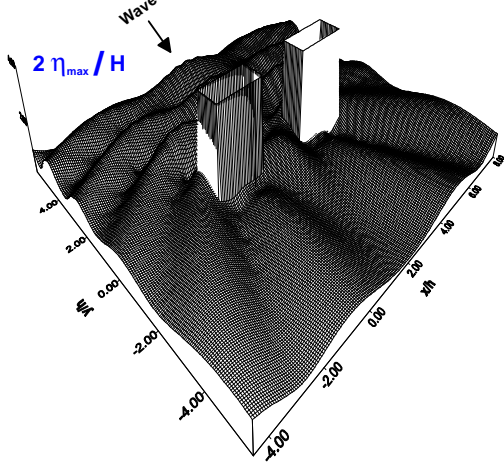
(a) Linear theory



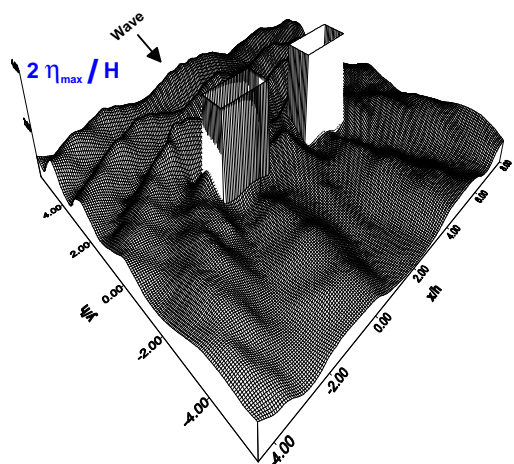
(b) Second order theory

Fig. 2.23 Contours of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=90^\circ).$$



(a) Linear theory



(b) Second order theory

Fig. 2.24 Oblique view of the maximum rising water level near two vertical rectangular columns

$$(k^{(1)}h=2.0, h/a=1.0, \Pi=0.06, e/D=1.0, \alpha=90^\circ).$$

### 3.2.2 비선형파력

Fig. 2.25는 2개의 복수연직원주구조물에 있어서  $a/h=0.862$ ,  $h/H=0.2$ ,  $e/D=1.0$ 의 경우에  $k^{(1)}a$ 의 변화에 따른 구조물 1과 2에 작용하는 무차원최대파력의 변화를 나타낸 결과로, Fig. 2.25(a)는 파향입사각  $\alpha=0^\circ$ 인 경우이고, Fig. 2.25(b)는  $\alpha=90^\circ$ 인 경우이다. Fig. 2.25(a)의 경우에 있어서 파가 입사해 오는 전면에 위치한 구조물 2에 전반적으로 큰 파력이 작용한다. 구조물 2의 최대파력은  $k^{(1)}a \approx 0.6$ 부근에서 발생하며, 비선형성분도 크게 나타나고,  $k^{(1)}a$ 값이 증가함에 따라 점점 감소하다가  $k^{(1)}a \approx 1.2$ 의 부근에서 다시 증가하여  $k^{(1)}a \approx 1.5$ 에서 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 특히,  $k^{(1)}a \approx 1.1$ , 1.8부근에서는 구조물 1에 작용하는 파력보다 작게 나타난다. 그리고, 천해영역인  $k^{(1)}a < 0.5$ 인 곳에서는 Stokes 2차파이론의 적용범위를 초과하므로 비선형해석결과는 발산하여 선형결과보다 매우 크게 나타난다. 구조물 1에서도 구조물 2와 마찬가지로  $k^{(1)}a \approx 0.6$ 에서 최대파력이 발생하며, 이 부분에서 비선형성분이 구조물 1과 마찬가지로 크게 나타나고,  $k^{(1)}a$ 가 증가할수록 점점 감소하는 경향을 나타낸다. Fig. 2.25(b)에 있어서는 파가 입사해 오는 방향에 대해 구조물이 대칭이므로 파력이 구조물 1과 2에 모두 동일하게 나타나고, Fig. 2.25(a)와 동일하게  $k^{(1)}a \approx 0.6$ 에서 최대파력이 발생하나 전체적인 파력분포는 파의 입사각  $\alpha=0^\circ$ 인 Fig. 2.25(a)의 경우에 비해  $k^{(1)}a$ 의 변동에 따른 변화가 작다.

Fig. 2.26~Fig. 2.27은 Fig. 2.25와 동일한 파랑조건과 배치간격에 대해서 정사각형과 직사각형단면의 복수(2개)연직주상구조물에 작용하는 무차원최대파력을 나타낸 것으로, 정사각형단면의 경우에 전반적인 파력의 변화양상은 연직원주구조물과 비슷한 경향을 나타내지만, 작용파력은 큰 값을 나타낸다. Fig. 2.27(a)는 직사각형단면의 연직주상구조물에 파가 입사각  $\alpha=0^\circ$ 로 입사하는 경우로, 입사파방향의 투영단면적이 원형단면과 정사각형단면에 비해 적으므로 작용파력이 작고, 구조물간의 상호영향이 작으므로 구조물 1과 2에 거의 비슷한 파력이 작용함을 알 수 있다. Fig. 2.28(b)에서는 정사각형단면의 경우와 입사파방향의 투영단면적이 동일하므로 비슷한 파력의 변화경향을 나타내고 있지만, 정사각형단면의 경우와는 달리 최대파력은  $k^{(1)}a \approx 1.0$ 에서 발생한다.

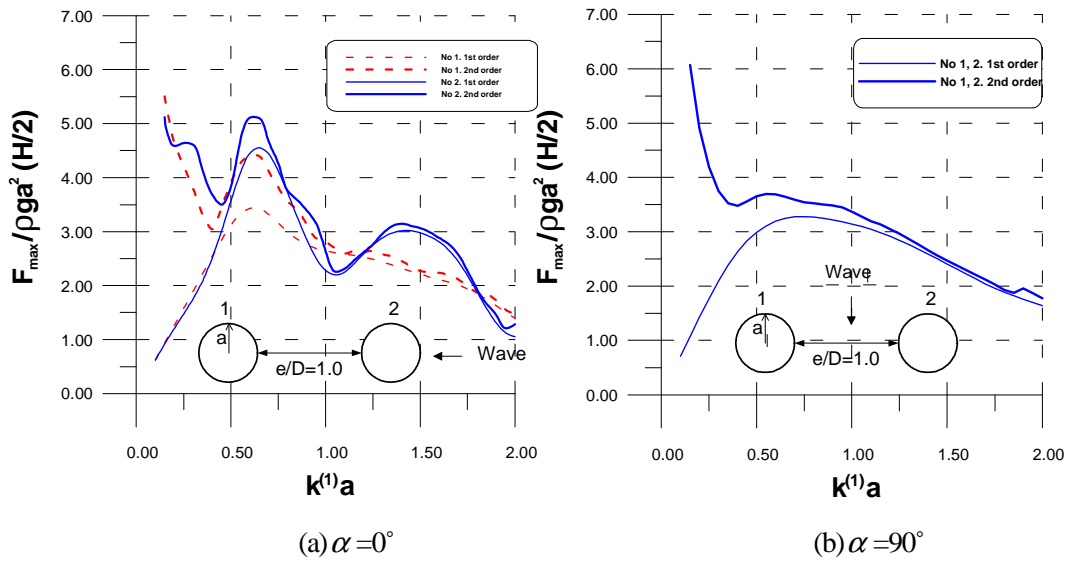


Fig. 2.25 Maximum wave force acting on two vertical circular columns.  
( $a/h=0.862$ ,  $H/h=0.2$ ,  $e/D=1.0$ ).

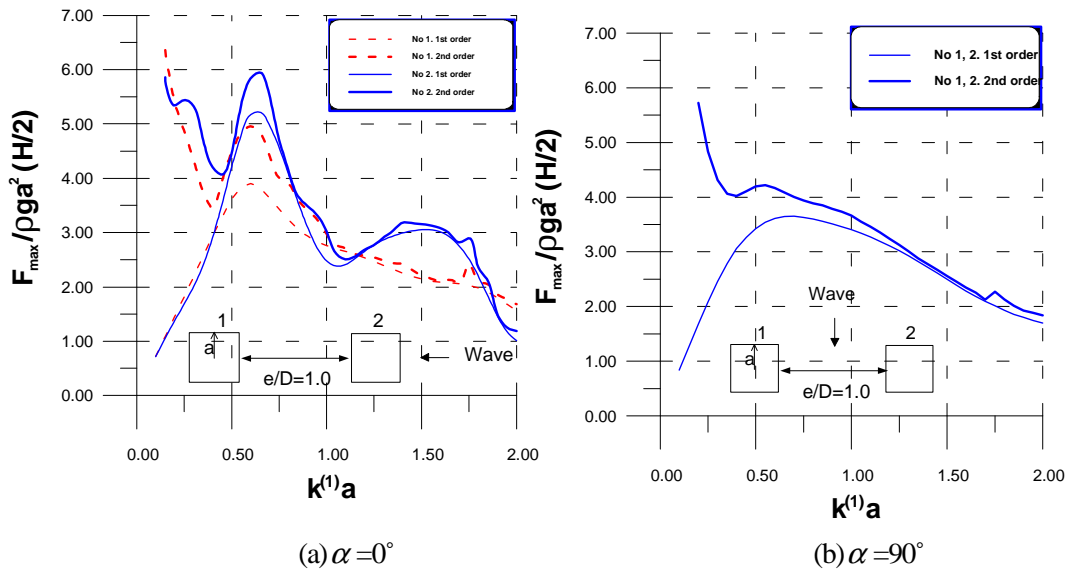


Fig. 2.26 Maximum wave force acting on two vertical square columns  
( $a/h=0.862$ ,  $H/h=0.2$ ,  $e/D=1.0$ ).

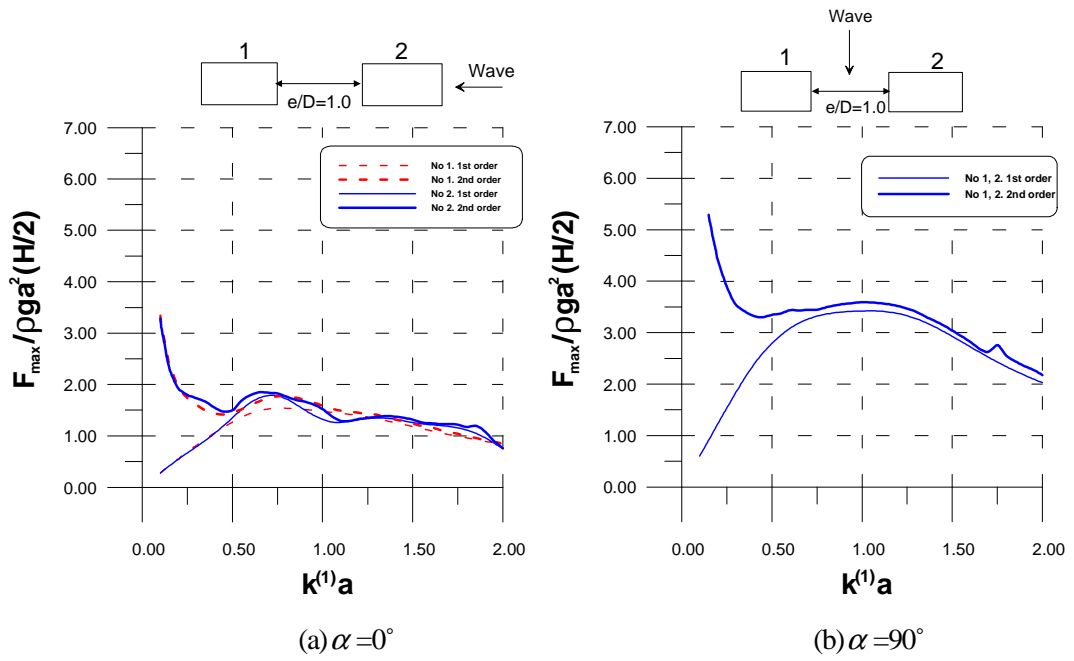


Fig. 2.27 Maximum wave force acting on two vertical rectangular columns  
 $(a/h=0.862, H/h=0.2, e/D=1.0)$ .

## 4. 결론

본 연구에서는 村上 등(1993)이 임의형상단면의 단일연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형의 해석법인 Stokes의 2차파이론에 기초한 섭동전개법과 Hankel 함수를 Green 함수로 사용하는 경계적분법을 병용하는 수법을 임의형상단면의 복수연직주상구조물에 확장·적용하여 비선형파력과 비선형파랑변형의 특성을 검토하였다. 수치해석결과의 타당성을 검증하기 위해 단수 및 복수(2개)연직원주구조물에 작용하는 파력을 Haskind법을 사용한 増田 등(1986)의 수치해석결과와 수리실험결과와 비교하였고, 파랑변형을 上村 등(1993)의 수리실험결과 및 수치해석결과와 비교하여 본 이론의 타당성을 검증할 수 있었다.

복수연직주상구조물의 설치간격, 입사파향각 및 Goda(1983)가 제시한 비선형파라미터에 따른 비선형파랑변형과 비선형파력의 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1)임의단면의 연직주상구조물에 의한 비선형파랑변형과 비선형작용파력을 해석할 수 있는 수치해석법(경계적분법)을 제안하였고, 이로부터 정도높은 해를 얻을 수 있었으며, 또한 본 이론의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2)파랑의 비선형성을 나타내는 비선형파라미터가 클수록 비선형성분은 크게 나타난다.

(3)구조물의 설치간격이 근접할수록 비선형성분의 영향은 커진다.

(4)단수연직주상구조물의 주변에서 무차원최대수면상승고의 크기는 파가 입사하는 방향에 있어서 최선단인 구조물의 전면에서 가장 큰 값을 나타내지만, 복수연직주상구조물에 있어서는 구조물간의 상호간섭으로 구조물의 전면뿐만 아니라 구조물의 후면 및 구조물과 구조물의 사이에서도 큰 값을 나타낸다.

(5)복수연직주상구조물이 근접하게 설치될 경우 구조물간의 상호간섭으로 단수연직주상구조물의 경우보다 파력이 크게 작용하고,  $k^{(1)}a$ 의 변화에 따른 파력의 변화양상도 단수연직구조물의 경우와는 복잡한 변화양상을 나타낸다.



## <참고문헌>

- Chen, M.C. and R.T. Hudspeth (1982) : Nonlinear diffraction by eigenfunction expansions, Proc. ASCE, Vol. 108, No. WW3, pp. 306-325.
- Dean, R.G and R.A Dalrymple (1984) : Water wave mechanics for engineers and scientists, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 296-305.
- Eatock Taylor, R. and S.M Hung (1987) : Second-order diffraction force on vertical cylinder in regular waves, Applied Ocean Res., Vol. 9, No.1, pp. 19-30.
- Garrison, C.J. (1979) : Hydrodynamic loading of large offshore structure three dimensional source distribution methods, Numerical Method in Offshore Engineering, O. Zienkiewics, R.Lewis and K. Stagg eds., John Wiley Sons, pp, 97-140.
- Goda, Y. (1983) : An unified nonlinearity parameter of water waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 22, No. 3, pp. 3-30.
- Issacson, M.Q. (1978) : Vertical cylinders of arbitrary section in wave, Journal of Waterway, Coastal and Ocean Eng., Vol. 104, No. WW4, pp.309-322.
- Kim, M.H. and D.K.P. Yue (1989) : The complete second-order diffraction solution for an axisymmetric body, part 1. monochromatic incident waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 200, pp. 235-264.
- Kriebel, D.L. (1990) : Nonlinear wave interaction with vertical cylinder, part I diffraction theory, Ocean Eng., Vol. 17, No. 4, pp. 345-377.

- ・ MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954) : Wave forces on piles : a diffraction, Tech. Memo., No. 69, Beach Erosion Board, pp. 1-17.
- ・ Molin, B. (1979) : Second-order diffraction loads upon three-dimensional bodies, Applied Ocean Res., Vol. 1, No. 4, pp. 197-202.
- ・ Patel, M. H. (1989) : Dynamics of offshore structure, Butterworths, London, pp. 188-190.
- ・ Sabuncu, T. and O. Goren (1985) : Second-order vertical and horizontal wave forces on a circular dock, Ocean Eng, Vol. 12, No. 4, pp. 341-361.
- ・ 井島武士, 周宋仁, 湯村やす (1974) : 任意形状の透過および不透過防波堤による波の散乱, 土木學會論文報告集, 第228巻, pp. 31-42.
- ・ 増田光一, 坂田親弘, 加藤 涉 (1986) : 複数の柱状體に作用する非線形波力に関する研究, 造船學會誌, 第160号, pp. 176-184.
- ・ 村上啓介, 吉田明德, 人江 功 (1993) : 任意断面形状の鉛直柱体と波の非線形干渉解析法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 846-850.
- ・ 海岸工学委員會 (1993) : 海岸波動・波・構造物・地盤の相互作用の解析法, pp. 340-349.
- ・ 眞田 武, 岩田好一郎, 水谷法美 (1996) : 大口徑圓管構造物による非線形回折波の2次近似理論, 土木學會論文集, No. 551, pp.75-87.
- ・ 水谷法美, 眞田 武, 水野香織, 藤岡才夫, 川島直人, 岩田好一郎 (1998) : 軸対称構造物および任意断面直立構造物による非線形回折波に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 831-835.

---

# 3장

## 비쇄파시 Full-nonlinear 해석법에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석

---

### 1. 개요

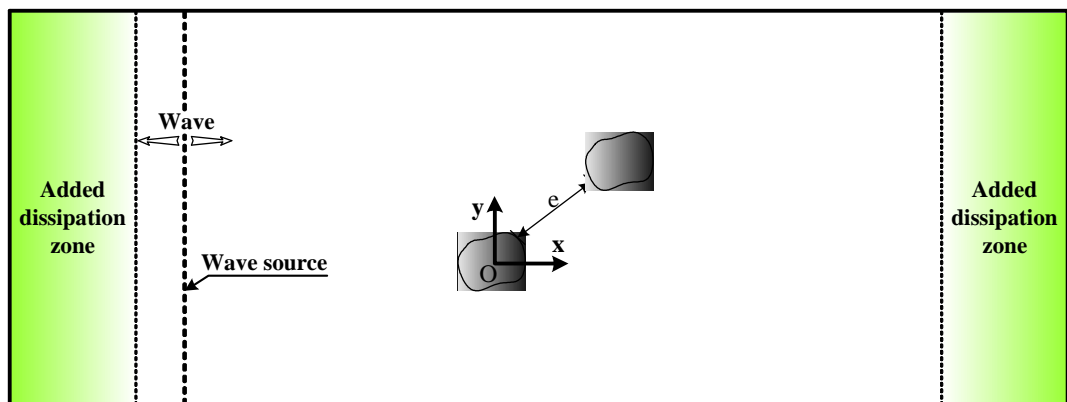
파력을 산정할 수 있지만 파랑변형을 산정할 수 없는 Haskind법에 기초를 두고 있는 기존의 연구(増田 등, 1986)와 복수의 연직주상구조물에 적용할 수 없는 기존의 연구(Molin, 1979)에 비하여, 제 2장의 Stokes의 2차파이론에 기초한 섭동전개법과 경계적분법을 병용하는 방법은 2개 이상의 연직주상구조물에 의한 회절파의 비선형 상호간섭을 해석할 수 있는 우수한 방법이다. 그러나, Stokes의 2차파이론의 적용범위를 초과하는 영역(Eatock Talyor and Hung, 1987), 수중에 잠긴 연직주상구조물, 수심방향으로 단면이 변화하는 구조물에 적용할 수 없는 한계가 있다.

따라서, 본 장에서는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 파랑과 구조물과의 비선형상호간섭에 따른 복잡한 자유수면의 거동특성을 고정도로 해석할 수 있는 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF(Volume Of Fluid)법(Full-nonlinear 해석법)을 적용하며, 이로부터 비쇄파시에 3차원 파동장에 설치된 임의형상단면의 복수연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형을 검토한다.

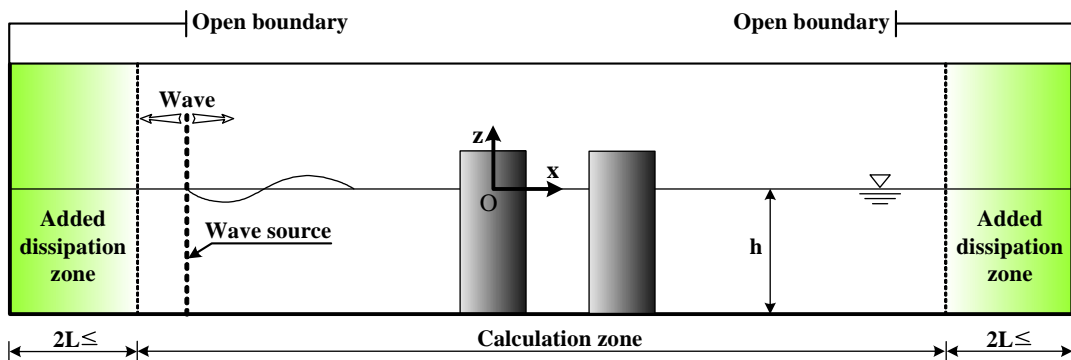
## 2. 수치해석이론

### 2.1 수치파동수로

본 연구에서는 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑 변형의 3차원특성을 해석하기 위하여 Fig. 3.1과 같은 수치파동수로를 고려한다. 수치파동수로는 부가감쇠영역(Added dissipation zone)과 해석영역(Calculation zone)으로 이루어져 있으며, 부가감쇠영역은 개경계(Open boundary)에서 파랑이 재반사되어 해석영역의 파동장이 교란되는 것을 방지하기 위하여 해석영역의 양단에 설치되어 있다. 계산영역내에는 수치적으로 파랑을 발생시키기 위한 조파소스가 고려되어 있다.



(a) Plan view



(b) Side view

Fig. 3.1 Definition sketch of 3D numerical wave channel.

### 2.1.1 기초방정식

유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 조파소스를 포함하는 연속방정식(3.1)과 Navier-Stokes의 운동방정식(3.2), (3.3), (3.4)로 구성된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \tilde{q} \quad (3.1)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\nu D_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu D_{xz}) \right\} \quad (3.2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial y} + 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\nu D_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu D_{yz}) \right\} \quad (3.3)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial z} + 2 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\nu D_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu D_{zz}) \right\} - g - \beta w \quad (3.4)$$

$$\tilde{q} = \begin{cases} \frac{q(y, z, t)}{\Delta x_s} & \text{at each source position } (x = x_s) \\ 0 & \text{at } x \neq x_s \end{cases} \quad (3.5)$$

여기서,  $x, y, z$  는 Cartesian좌표계,  $\tilde{q}$  는  $x = x_s$  에서 조파소스의 유량밀도로서,  $x \neq x_s$  위치에서는 0으로 주어진다. 그리고,  $\Delta x_s$  는 조파위치에서  $x$ 축 방향의 격자폭  $u, v, w$ 는  $x, y, z$  방향의 속도성분,  $t$ 는 시간,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\nu$ 는 유체의 동점성 계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수,  $D_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ )는 유체의 전단응력 Tensor로 각각 정의된다.

### 2.1.2 엇갈린격자

본 수치해석기법은 유한차분법에 기초를 두고 있으므로 계산영역을 크기가 일정한 직사각형의 격자로 분할하고, 셀 전체에 유체가 있는 경우를 유체셀, 셀 전체에 기체가 있는 경우를 기체셀, 셀내에 유체와 기체가 혼합되어 있는 경우를 표면셀, 셀 전체에 구조물이 있는 경우를 구조물셀로 각각 정의한다. 또한, 격자 주위에는 직접 계산에 이용되지는 않지만 경계처리시에 필요한 가상셀을 둔다. 격자를 설정한 후에는 각 셀에서의 유속  $u, v, w$ 를 각각 셀 경계인 오른쪽과 지면안쪽 및 위쪽에 위치시키고, 조파소스의 유량밀도  $\tilde{q}$  및 VOF함수  $F$ 를 각각 셀 중심에 위치하도록 하여 변수들이 엇갈리게 격자를 구성하는 Fig. 3.2와 같은 엇갈린격자(Staggered mesh)를 적용한다. 이러한 엇갈린격자는 각각의 셀이 연속방정식을 만족시키는 검사체적(Control volume)이 되고, 운동량 교환은 각 셀의 면을 통해 이루어진다.

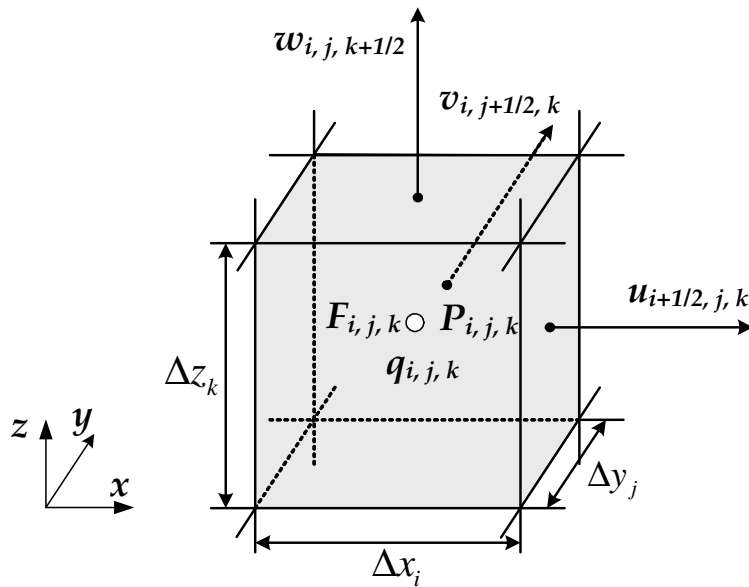


Fig. 3.2 Location of variables for a typical mesh cell.

### 2.1.3 기초방정식의 이산화

식(3.1)의 연속방정식을 셀 중앙에서 2차정도의 중심차분근사시키면, 다음과 같이 이산화된 식(3.6)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1}}{\Delta x_i} + \frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} - v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1}}{\Delta y_j} + \frac{w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} - w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta z_k} = \tilde{q}_{i,j,k}^{n+1} \quad (3.6)$$

여기서, 위 첨자는 시간스텝, 아래첨자는 셀의 위치를 각각 나타낸다.

식(3.2)~식(3.4)의 운동방정식에 대해 각 방향의 차분근사는 다음과 같다.

$$u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \Delta t \left\{ (\text{Force})_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\Delta x)_{i+\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.7)$$

$$v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} = v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n + \Delta t \left\{ (\text{Force}+\text{Sor})_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j+1,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\Delta y)_{j+\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.8)$$

$$w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} = w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n + \Delta t \left\{ (\text{Force}+\text{Sor}+\text{Damp}+\text{g})_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j,k+1}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\Delta z)_{k+\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.9)$$

여기서, "Force"는 물체력과 점성항을, "Sor"는 소스항, "Damp"는 부가감쇠영역에 대한 감쇠항을 각각 나타낸다. 위 식에서 물체력, 점성, 조파소스 및 중력항은  $n$  시간스텝에서 근사되고,  $\Delta x_{i+1/2}$ ,  $\Delta y_{j+1/2}$ ,  $\Delta z_{k+1/2}$  는 인접한 셀의 평균치로 계산된다.

식(3.2)~식(3.4)의 운동방정식에 대해서 시간항에 전진차분근사를, 압력, 중력 및 소스항에는 중앙차분근사를, 이류항에 2차정도의 중앙차분과 1차정도의 상류차분을 혼합한 차분근사를 도입하였다.

## (1) Force term

식(3.7)~식(3.9)에서 "*Force*"항은 이류항과 점성항을 포함하는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (\text{Force})_{i+\frac{1}{2},j,k}^n &= \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\}_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \\
 &\quad + \left\{ 2\nu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \nu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \nu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\}_{i+\frac{1}{2},j,k}^n
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{Force})_{i,j+\frac{1}{2},k}^n &= \left\{ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right\}_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \\
 &\quad + \left\{ \nu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + 2\nu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \nu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\}_{i,j+\frac{1}{2},k}^n
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{Force})_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n &= \underbrace{\left\{ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}_{\text{advection term}} \\
 &\quad + \underbrace{\left\{ \nu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \nu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + 2\nu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}_{\text{viscosity term}}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

## (2) Source term

"*Sor*"항은 셀의 중앙에서 산정되므로 중앙차분근사를 도입한 다음의 식(3.13), 식(3.14)로 나타낼 수 있다.



$$(\text{Sor})_{i,j+\frac{1}{2},k}^n = \frac{2\nu}{3} \frac{\tilde{q}_{i,j+\frac{1}{2},k} - \tilde{q}_{i,j,k}}{\Delta y_{j+\frac{1}{2}}} \quad (3.13)$$

$$(\text{Sor})_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n = \frac{2\nu}{3} \frac{\tilde{q}_{i,j,k+\frac{1}{2}} - \tilde{q}_{i,j,k}}{\Delta z_{k+\frac{1}{2}}} \quad (3.14)$$

### (3) Other terms

개경계(Open boundary)에서 파랑이 재반사되어 해석영역의 파동장이 교란되는 것을 방지하기 위한 감쇠항과 중력가속도항은 다음의 식으로 이산화된다.

$$(\text{Damp} + g)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n = \frac{\beta_{i,j,k+\frac{1}{2}} + g_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta z_{k+\frac{1}{2}}} \quad (3.15)$$

본 수치해석에서는  $n$  시간에서의 초기조건, 속도 및 압력을 이용하여 이산화된 식 (3.7)~식(3.9)로부터 각 셀에서  $n+1$  시간에서 유체입자의 속도  $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$  을 양해법 (Explicit method)으로 산정한다.

#### 2.1.4 Two-step projection method

본 연구에서는 엇갈린격자를 이용하여 지배방정식과 VOF함수의 이류방정식을 유한 차분법으로 차분근사하며, Two-step projection기법(Chorin, 1968)으로 수치계산을 수행하였다.

Two-step projection기법은 First step과 Second step으로 구성되며, HSMAC기법의 경우에는 자유표면에 대한 압력의 정의위치가 실제의 자유표면위치와 다르기 때문에 자유표면에 인접한 유체셀로부터 선형근사하여 자유표면셀내의 압력을 산정하지만, 본 연구의 Two-step projection기법은 이러한 자유표면의 부근에서 복잡한 압력근사는 수행하지 않는

다. 따라서, 방대한 컴퓨터 메모리 및 많은 계산시간이 요구되는 HSMAC기법의 단점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

## (1) First step

First step은 Navier-Stokes의 운동방정식 (3.2)~(3.4)에서 압력항을 제외한 나머지항을 전진차분으로 근사하며,  $n+1$  시간에서 유속  $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$ 의 대신에 식(3.16)~식(3.18)로 주어지는 가유속(Temporary velocity)  $\tilde{u}^{n+1}, \tilde{v}^{n+1}, \tilde{w}^{n+1}$ 을 도입한다.

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{u}^{n+1} - u^n}{\Delta t} = & \left[ - \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right. \\ & \left. + \left\{ 2 \left( \frac{\partial}{\partial x} (\nu D_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu D_{xz}) \right) \right\} \right]^n \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{v}^{n+1} - v^n}{\Delta t} = & \left[ - \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right. \\ & \left. + \left\{ 2 \left( \frac{\partial}{\partial x} (\nu D_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu D_{yz}) \right) \right\} - \frac{2\nu}{3} \frac{\tilde{q}}{\partial y} \right]^n \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{w}^{n+1} - w^n}{\Delta t} = & \left[ - \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right. \\ & \left. + \left\{ 2 \left( \frac{\partial}{\partial x} (\nu D_{zx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu D_{zz}) \right) \right\} - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial z} - g - \beta w \right]^n \end{aligned} \quad (3.18)$$

여기서,  $n$ 은 시간스텝,  $\Delta t$ 는 시간스텝폭을 각각 나타내며, 식(3.16)~식(3.18)에서 미지수항인 가유속은 양해법으로 산정될 수 있다.

## (2) Second step

Second step에서는  $n+1$  시간에서 산정된 First step에서의 가유속  $\tilde{u}^{n+1}, \tilde{v}^{n+1}, \tilde{w}^{n+1}$ 과 실 유속  $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$ 과의 차이를 압력항의 미분치로 보정하며, 다음의 식(3.19)~식(3.21)

과 같이 주어진다.

$$\frac{u^{n+1} - \tilde{u}^{n+1}}{\Delta t} = \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x} \quad (3.19)$$

$$\frac{v^{n+1} - \tilde{v}^{n+1}}{\Delta t} = \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial y} \quad (3.20)$$

$$\frac{w^{n+1} - \tilde{w}^{n+1}}{\Delta t} = \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial z} \quad (3.21)$$

식(3.19)~식(3.21)과 다음의 연속방정식(3.22)를 결합하면 압력보정에 관한 Poisson압력 방정식(3.23)을 산정할 수 있으며, 이로부터  $n+1$  시간에서 압력을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial u^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial v^{n+1}}{\partial y} + \frac{\partial w^{n+1}}{\partial z} = \tilde{q} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial z} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{u}^{n+1}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tilde{v}^{n+1}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tilde{w}^{n+1}) - \tilde{q} \right\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

### (3) Poisson 방정식의 좌표변환

Two-step projection의 Second step에서 얻어지는 Poisson방정식(3.23)은  $n+1$  시간에서의 압력  $p$  을 포함하게 되며, 그 해법으로 매트릭스를 구성하게 된다. 일반적으로 압력  $p$  의 정의위치는 계산셀의 중앙에 위치하게 되므로 압력항에 대한 Poisson방정식은 셀의 중앙에서 계산된다. 그러나, 이러한 일반적인 Poisson방정식의 해법은 유체셀과 기체셀에서 주어지는 압력을 선형보간하여 자유표면(표면셀)에서의 압력을 구하므로 압력산정에 대한 계산상의 오차를 포함하게 될 뿐만 아니라, 압력근사의 수렴에 방대한 컴퓨터 메모

리 및 많은 계산시간이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 식(3.23)의 Poisson방정식을 푸는 단계에서만 좌표계  $(\xi, \lambda, \varsigma)$  로 변환하여 연립1차방정식을 구성한다. 또한, 표면셀에서의 압력은 계산영역의 전체에 대하여 좌표변환된 Poisson방정식의 매트릭스계산으로 직접 산정될 수 있다. 이 때, 계산영역은 격자폭  $\Delta\xi = \Delta\lambda = \Delta\varsigma = 1$  을 갖는 균일한 정사각형의 격자이다. 일반적으로 유한차분법에서 좌표계  $(\xi, \lambda, \varsigma)$  의 사용은 복잡한 경계면을 갖는 계산영역에서 매우 효율적인 방법으로 알려져 있다(Fletcher, 1991).

식(3.23)에서 좌변항에 포함된 미분항을 교차미분하면 식(3.24)를 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi} \right) \right\} + \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \left( \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \lambda} \right) \right\} + \frac{\partial \varsigma}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \varsigma} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \left( \frac{\partial \varsigma}{\partial z} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \varsigma} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.24)$$

그리고, Jacobian과 계산셀과의 관계를 식(3.24)에 적용하면, 다음의 식(3.25)가 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial z} \right) \\ &= \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \delta \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi} \right\} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \varepsilon \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \lambda} \right\} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \varsigma} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \sigma \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \varsigma} \right\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

여기서,  $J$  는 Jacobian,  $\delta, \varepsilon, \sigma$  는 형상계수로, 다음의 식(3.26)과 식(3.27)로 각각 정의된다.

$$\begin{aligned} J &= \frac{\partial x}{\partial \xi} \left( \frac{\partial y}{\partial \lambda} \frac{\partial z}{\partial \varsigma} - \frac{\partial y}{\partial \varsigma} \frac{\partial z}{\partial \lambda} \right) - \frac{\partial x}{\partial \lambda} \left( \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \varsigma} - \frac{\partial y}{\partial \varsigma} \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial x}{\partial \varsigma} \left( \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \lambda} - \frac{\partial y}{\partial \lambda} \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) \\ &= \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \lambda} \frac{\partial z}{\partial \varsigma} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{1}{J} \frac{\partial^2 y}{\partial \lambda^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} \\ \varepsilon = \frac{1}{J} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \zeta^2} \\ \sigma = \frac{1}{J} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 y}{\partial \lambda^2} \end{cases} \quad (3.27)$$

그리고, 식(3.23)의 우변항은 소스항으로 식(3.28)과 같이 표현된다.

$$S_p = \frac{V_c}{\Delta t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{u}^{n+1}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tilde{v}^{n+1}) + \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{w}^{n+1}) - \tilde{q} \right\} \quad (3.28)$$

여기서,  $S_p$  는 Poisson방정식의 소스항,  $V_c$  는 셀의 체적이다.

따라서, 식(3.25)와 식(3.28)로부터 식(3.29)의 Poisson방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \delta \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \xi} \right\} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \varepsilon \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \lambda} \right\} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ \frac{1}{\rho^n} \sigma \frac{\partial p^{n+1}}{\partial \zeta} \right\} = S_p \quad (3.29)$$

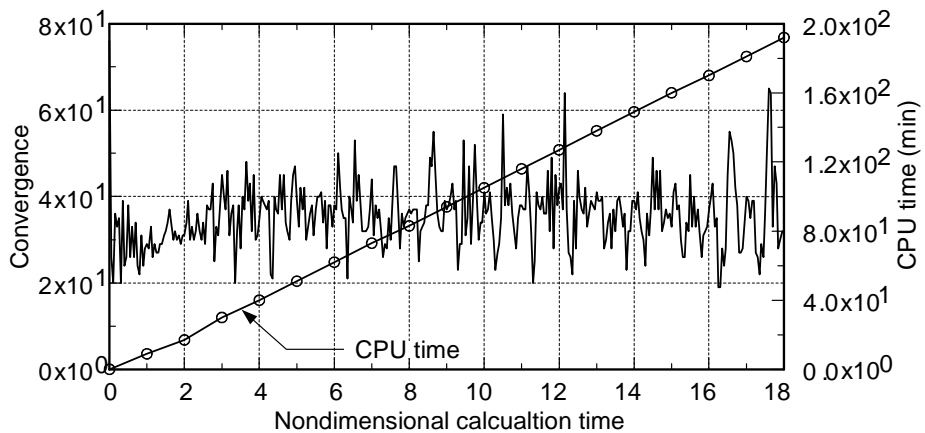
본 연구에서는 식(3.29)로 주어지는 Poisson방정식에 대해 연립1차방정식을 구성하고, 연립1차방정식의 해법으로 ICCG법(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient)을 적용하였다 (Lee, 2006).

#### (4) Two-step projection method 의 효율성

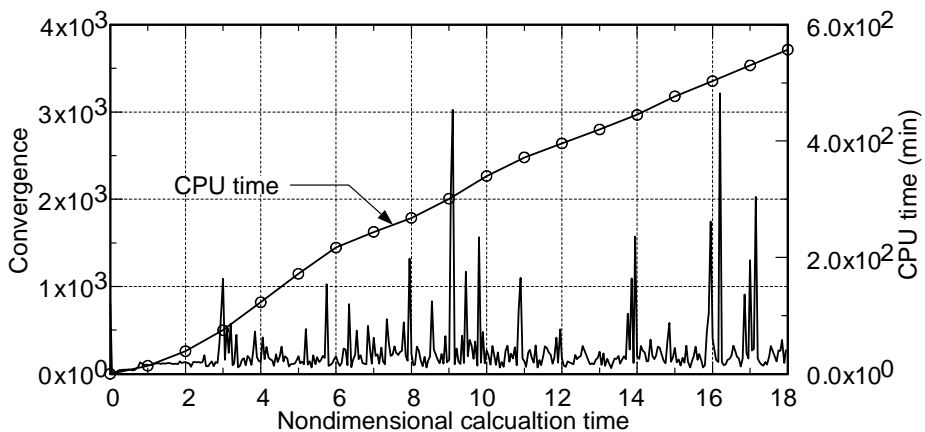
본 연구는 Two-step projection기법과 좌표변환된 Poisson방정식을 이용하여 Navier-Stokes의 운동방정식을 계산하며, 이 때 계산상의 수렴횟수 및 컴퓨터의 계산시간을 HSMAC기법으로부터 얻어진 결과와 비교 · 검토한 것이 Fig. 3.3에 제시되어 있다.

Fig. 3.3으로부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 결과(Fig. 3.3(a))는 HSMAC기법(Fig. 3.3(b))의 결과보다 훨씬 빠르고 안정적이라는 것을 알 수 있고, 수렴횟수에  $10^1$  오더를, 또한 계산시간에 있어서는 최대  $2.0 \times 10^2$  (min) 을 나타내는 것을 알 수 있다.

따라서, Navier-Stokes 운동방정식의 계산방법으로 본 연구에서 적용하는 수치해석기법은 기존의 HSMAC기법과 비교하여 매우 효율적인 방법인 것으로 판단된다.



(a) This study



(b) HSMAC scheme

Fig. 3.3 Comparison of numerical scheme for computational run time and convergence

( $H/L=0.02$ ,  $h/L=0.102$ ).

## 2.2 VOF 법에 의한 자유수면의 추적

### 2.2.1 이류방정식

3차원공간을 운동하는 유체입자에 대해 다음의 식과 같은 VOF함수의 이류방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3.30)$$

식(3.30)에 정의된 함수  $F(x, y, z, t)$  는 점  $(x, y, z)$  가 유체에 포함된 경우는  $F(x, y, z, t) = 1$ 로 주어지며, 이는 점  $(x, y, z)$  의 근방이 유체영역이라는 것을 의미하고, 반대로  $F(x, y, z, t) = 0$ 은 기체상태인 것을 의미한다.

식(3.30)을 초기상태  $t = 0$  에서  $F(x, y, z, t) = 1$ 을 만족하는 점에 대해 계산을 수행하면 유체상태에 있어서 대부분의 점의 시간거동을 표현할 수 있다. 여기서, VOF함수는 자유수면의 위치가  $F=1$ 과  $F=0$ 인 점의 사이에 있는 영역에 존재한다는 것 이외에는 특별한 물리적인 의미를 가지지는 않는다.

유체를 비압축성으로 가정하였으므로 식(3.30)에 식(3.1)을 적용하면 식(3.31)과 같은 보존형의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fv)}{\partial y} + \frac{\partial(Fw)}{\partial z} = F\tilde{q} \quad (3.31)$$

식(3.31)의  $F$ 를 일정한 값을 갖는 물리량, 즉 유체의 체적율로 고려하면 식(3.31)은 유체영역에서만 정의되는 식이 아닌 기체상태의 영역까지 포함하는 전 영역으로 적용이 가능한 식으로 된다. 또한,  $F$ 의 값으로써  $0 \leq F \leq 1$ 을 취할 수 있다.



## 2.2.2 이류방정식의 이산화

Fig. 3.2에 나타난 엇갈린격자를 이용하여 식(3.31)을 시간항에 대해 1차정도의 전진차분근사를, 이류항에 대하여 2차정도의 중앙차분근사를 적용하면 다음과 같이 이산화된다.

$$\frac{F_{i,j,k}^{n+1} - F_{i,j,k}^n}{\Delta t} = - \left[ \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n F_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n F_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{(\Delta x)_i} + \frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n F_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - v_{i,j-\frac{1}{2},k}^n F_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{(\Delta y)_j} \right. \\ \left. + \frac{w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n F_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n F_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{(\Delta z)_k} - F_{i,j,k}^n q_{i,j,k}^{*n+1} \right] \quad (3.32)$$

이론적으로 식(3.32)로부터 각 셀에서의 VOF함수  $F$ 값에 의해 유량의 수송이 수치적으로 계산된다.

## 2.2.3 자유수면의 모델링

자유수면의 시간에 따른 위치와 현상은 식(3.31)로 표현된 VOF함수의 이류방정식으로부터 각 셀에서 VOF함수  $F$ 의 값으로 알 수 있다. 각 셀에서 VOF함수  $F$ 의 값으로부터 Fig. 3.4(편의상 2차원으로 표시)에 나타난 바와 같이  $F=1$ 일 경우 유체셀로,  $F=0$ 일 경우 기체셀로,  $0 < F < 1$ 일 경우 자유수면을 갖는 표면셀로 판단하여 식 (3.32)의 차분근사에 의해 표면방향을 순차적으로 계산함으로써 자유수면의 추적이 가능하게 된다.

## 2.2.4 자유수면의 판정

전술한 바와 같이 VOF함수  $F$ 가  $0 < F < 1$ 의 범위에 있는 경우를 표면셀이라고 판단하면, 경계조건의 처리 등에 계산이 복잡해지고 계산이 불안정할 수 있기 때문에 본 계산에서는 표면셀은 기체셀과 유체셀 사이에 존재한다는 가정을 부과하여 표면셀을 판단하는 것으로 하였다. 따라서, Fig. 3.5(a)와 Fig. 3.5(b)(편의상 2차원으로 표시)는 VOF함수  $F$ 의 값으로부터는 표면셀로 판단될 수 있지만, 표면셀이 유체셀과 기체셀 사이에 존재한다는 가정을 만족하고 있지 않으므로 Fig. 3.5(a)의 경우는 표면셀을 유체셀로 간주하고,

Fig. 3.5(b)의 경우는 표면셀을 기체셀로 간주한다. 이러한 표면셀의 가정으로 인해 유체 내에 다량의 기포가 혼입되거나 자유수면에서 수괴가 이탈하는 과정을 충분히 재현할 수 없는 단점을 지니지만, 이는 셀 간격을 좁게 함으로써 그에 따른 영향을 최대한 억제할 수 있고, 유속과 압력의 경계조건이 명확히 되므로 계산의 안정을 도모할 수 있다.

이상과 같이 셀이 판정되면 표면셀에 대해 자유수면의 방향을 나타내는 *Flag NF* 를 결정한다. *NF* 의 결정은 표면셀의 주변에서 VOF함수를 산정하여 VOF함수의 합이 최대인 방향, 즉 유체가 많이 분포된 방향을 실제의 자유수면의 형상에 가까운 것으로 판정하는 VOF함수값에 의한 방법을 이용한다. 즉, 셀(*i, k*)에 대해서 *x*의 (-) 방향에 있는 유체의 양  $FZ_{i-1,k}$ , (+) 방향의 유체의 양  $FZ_{i+1,k}$ , *z*의 (-) 방향에 있는 유체의 양  $FX_{i,k-1}$ , (+) 방향의 유체의 양  $FX_{i,k+1}$ 를 얻은 후 가장 큰 값을 갖는 방향을 자유수면의 방향으로 결정한다.

$$FX_{i,k} = F_{i-1,k} + F_{i,k} + F_{i+1,k} \quad (3.33)$$

$$FZ_{i,k} = F_{i,k-1} + F_{i,k} + F_{i,k+1} \quad (3.34)$$

Fig. 3.6(편의상 2차원으로 표시)과 같이 표면셀 (*i, k*)는 Fig. 3.6(a)와 Fig. 3.6(b)의 2가지 경우로 한정된다. 식(3.34), 식(3.35)으로부터 각 방향의 유체량을 산정하면 표면셀의 자유수면 방향은 Fig. 3.6(a)로 판정된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 적용한 3차원에 대한 자유수면의 방향은 다음의 식(3.35)~식(3.40)과 같이 결정되며, 셀 분류방법을 Table 3.1에 종합적으로 나타낸다.

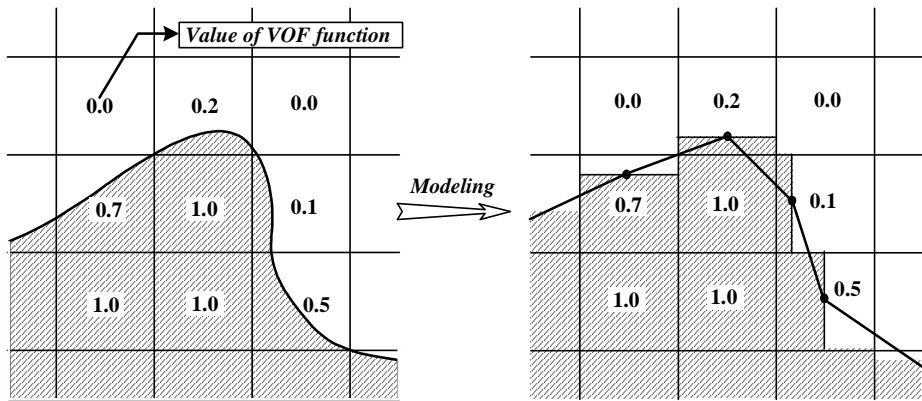


Fig. 3.4 Modeling of free surface.

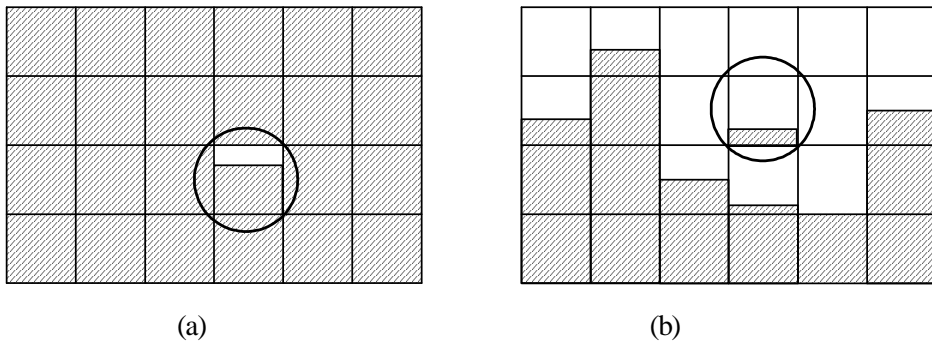


Fig. 3.5 Exception on the classification of cells.

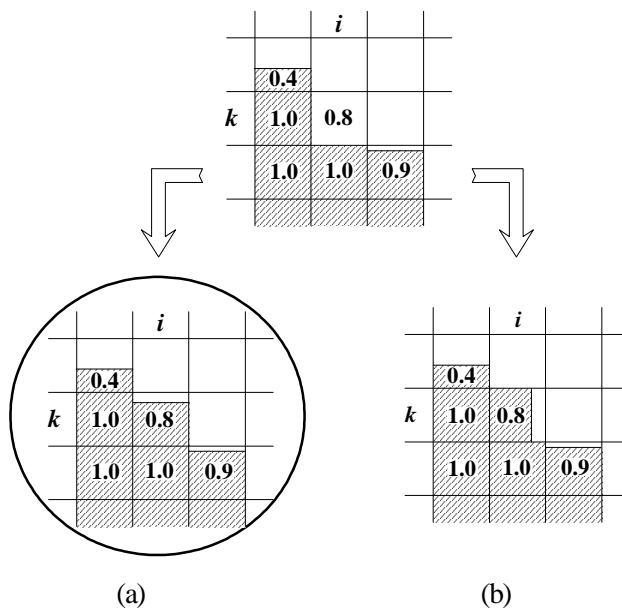


Fig. 3.6 Evaluation of free surface shape.

$$FX_{i-1,j,k} = 4F_{i-1,j,k} + F_{i-1,j-1,k} + F_{i-1,j+1,k} + F_{i-1,j,k-1} + F_{i-1,j,k+1} \quad (3.35)$$

$$FX_{i+1,j,k} = 4F_{i+1,j,k} + F_{i+1,j-1,k} + F_{i+1,j+1,k} + F_{i+1,j,k-1} + F_{i+1,j,k+1} \quad (3.36)$$

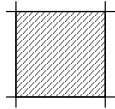
$$FY_{i,j-1,k} = 4F_{i,j-1,k} + F_{i-1,j-1,k} + F_{i+1,j-1,k} + F_{i,j-1,k-1} + F_{i,j-1,k+1} \quad (3.37)$$

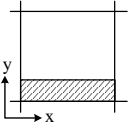
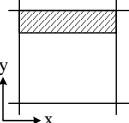
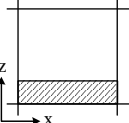
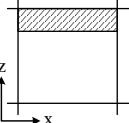
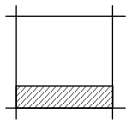
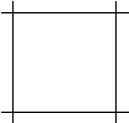
$$FY_{i,j+1,k} = 4F_{i,j+1,k} + F_{i-1,j+1,k} + F_{i+1,j+1,k} + F_{i,j+1,k-1} + F_{i,j+1,k+1} \quad (3.38)$$

$$FZ_{i,j,k-1} = 4F_{i,j,k-1} + F_{i-1,j,k-1} + F_{i+1,j,k-1} + F_{i,j-1,k-1} + F_{i,j+1,k-1} \quad (3.39)$$

$$FZ_{i,j,k+1} = 4F_{i,j,k+1} + F_{i-1,j,k+1} + F_{i+1,j,k+1} + F_{i,j-1,k+1} + F_{i,j+1,k+1} \quad (3.40)$$

Table 3.1 Determination of the free surface orientation.

NF	셀분류	셀의 상태	
0	유체셀		셀이 유체로 채워져 있고 인접한 기체셀이 없다.
1	표면셀		표면이 x축에 수직이고 유체셀이 x의 (-)방향에 존재한다.
2	표면셀		표면이 x축에 수직이고 유체셀이 x의 (+)방향에 존재한다.

3	표면셀		표면이 $y$ 축에 수직이고 유체셀이 $y$ 의 (-)방향에 존재한다.
4	표면셀		표면이 $y$ 축에 수직이고 유체셀이 $y$ 의 (+)방향에 존재한다.
5	표면셀		표면이 $z$ 축에 수직이고 유체셀이 $z$ 의 (-)방향에 존재한다.
6	표면셀		표면이 $z$ 축에 수직이고 유체셀이 $z$ 의 (+)방향에 존재한다.
7	표면셀		1-6의 표면셀로 정의되기 이전의 표면셀
8	기체셀		셀이 기체로 채워져 있고 인접한 유체셀이 없다.

## 2.2.5 수치계산

각 방향의 유속을 식(3.32)에 대입하면 각 셀에서 VOF함수  $F$ 를 계산할 수 있다. 그러나, VOF함수  $F$ 의 이류는 유체의 체적율에 대한 이류로서 일반적으로 이류항에 대해서 안정성이 확보되는 상류차분을 이용하는 경우에는 셀내에 균일한  $F$ 의 비율로 유체가 있는 것으로 계산되기 때문에 수치확산이 발생하기 쉽고, 또한 자유수면의 형상이 불분명하게 되기 때문에, VOF함수  $F$ 가 계단함수이기 때문에 발생할 수 있는 비연속성을 보완하기 위하여 유량을 이동시키는 특수한 알고리즘이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 수치확산을 방지하기 위하여 각 계산방향에 대하여 이류면을 지나는 체적유량을 계산하고, 이를 이용하여 표면을 전진시키는 Hirt and Nichols(1981)가 VOF함수의 이류계산에 사용한 Donor-acceptor법을 적용한다. 이는 이류면에서 VOF함수  $F_{AD}$ 의 값이 Donor(상류측 셀)과 Acceptor(하류측 셀)에서의  $F$ 값에 의해서 결정되는 방법

으로, Acceptor셀의 자유수면형상과 이류로 운반되는 유체형상의 연속성으로부터  $F_{AD}$  를 결정하여 자유수면의 확산을 방지하는 점에 그 특징이 있다. 이하에 Donor- acceptor법의 기본적인 성질에 관하여 간단히 기술한다.

Fig. 3.7에서 Donor셀( $i$ ) 과 Acceptor셀( $i+1$ ) 의 경계인 이류면 ( $i+1/2$ ) 에서의 연직 방향의 유속을  $u$  로 하고 Donor셀과 Acceptor셀을 각각  $D$  와  $A$  , 이류면을  $AD$  로 표기한다.

기체상태나 유체상태가 완전히 분리된 두 상태의 흐름을 생각하고, Donor셀과 Acceptor셀에서 기체의 체적율을 각각  $\alpha_D, \alpha_A$  로 하면 이류면  $AD$  에서의 유체밀도는 다음의 식(3.41)~식(3.43)과 같이 주어진다.

$$\rho_{i+1/2} = \rho_{AD} = \rho_l \quad (\alpha_D = 1) \quad (3.41)$$

$$\rho_{i+1/2} = \rho_{AD} = \rho_g \quad (\alpha_D = 0) \quad (3.42)$$

$$\rho_{i+1/2} = \rho_{AD} = \rho_g \alpha_A + \rho_l (1 - \alpha_A) \quad (0 < \alpha_D < 1) \quad (3.43)$$

여기서,  $\rho_l$  은 유체의 밀도,  $\rho_g$  는 기체의 밀도를 각각 나타낸다.

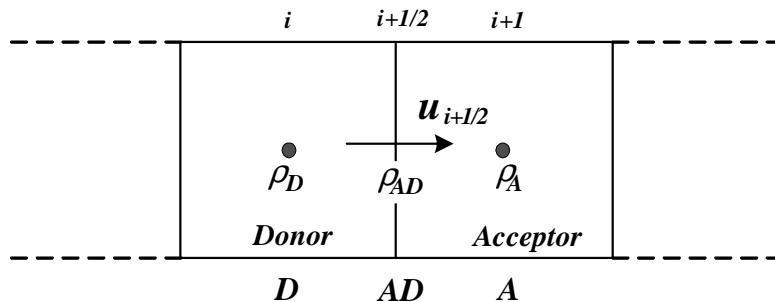


Fig. 3.7 Definition of donor-cell and acceptor-cell.

식(3.41)은 Donor셀이 유체만으로 채워져 있다면( $\alpha_D = 1$ ) 셀경계를 통과하여 Acceptor셀로 이동하는 것 역시 유체이어야 함을 의미하고, 식(3.42)는 Donor셀이 기체상태

( $\alpha_D = 1$ ) 인 경우로 셀경계를 통과해서 Acceptor셀로 이동하는 것 역시 기체이어야 함을 의미한다.

식(3.43)은 Fig. 3.8에 나타내는 바와 같이 Donor셀이 유체와 기체가 혼합된 상태 ( $0 < \alpha_D < 1$ ) 이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 셀경계에서의 유체는 Acceptor셀이 기체상태( $\alpha_A = 1$ ) 인 Fig. 3.8(a)의 경우는  $\rho_{AD} = \rho_A = \rho_g$ , Acceptor셀이 유체상태( $\alpha_A = 0$ ) 인 Fig. 3.8(b)의 경우에 대해서는  $\rho_{AD} = \rho_A = \rho_l$  이 된다. 즉, 충분히 작은 시간인  $\Delta t$  시간에는 기체와 유체의 혼합류가 Acceptor셀로 이동하지 않음을 의미하고, 이것이 Donor측에 있는 기체와 유체의 경계면 위치를 분명하게 한다. 만약 셀경계에서의 밀도를 기체와 유체의 혼합류로 정의하면 Donor셀과 Acceptor셀의 어느 쪽에 기체와 유체의 경계면이 있는가를 알 수 없게 된다.

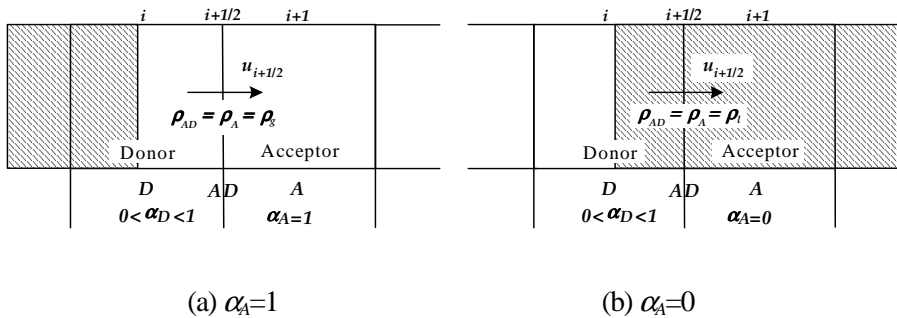


Fig. 3.8 Fluid density of boundary cell for donor-acceptor method.

Fig. 3.9는 이류면 AD에서 유속값의 (+), (-)에 따른 첨자의 변화를 나타내며, Fig. 3.10은 이류면을 기준으로 한 표면셀의 분류와 이류량을 각각 나타낸다. 이류량은 Donor-acceptor법에 의해 계산되며, 표면의 방향에 의해 외견상 상류차분과 하류차분으로 구별되어 이류면 AD와 Donor셀의 표면이 수직일 경우는 상류차분, 이류면 AD와 Donor셀의 표면이 수평일 경우는 하류차분을 수행하여 정도를 높이게 된다. 따라서, 상류차분과 하류차분을 조합함으로써 불합리한 해의 발생을 막고, 자유수면에서의 수치확산을 최소화한다.

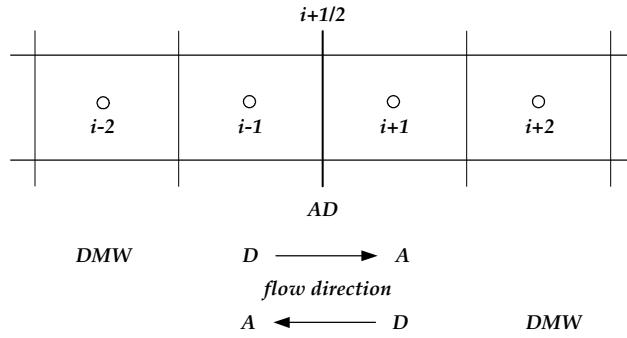


Fig. 3.9 Change of subscript in the boundary cell.

Fig. 3.10에서 Donor셀과 Acceptor셀의 경계인 이류면에서 유속을  $u$  로 하면  $V = u \cdot \Delta t$  는  $\Delta t$  시간 동안에 Donor셀로부터 Acceptor셀로 수송되는 이류량이 된다.

Fig. 3.10(a)에 나타난 바와 같이 이류면  $AD$  와 Donor셀의 표면이 수직인 경우에는 이류면에 있어서 VOF함수  $F_{AD}$  의 값이 Donor셀의  $F_D$  의 값과 일치한다. 반대로, Fig. 3.10(b) 및 Fig. 3.10(c)와 같이 이류면과 Donor셀의 표면이 수평인 경우는 이류면에 있어서 VOF함수  $F_{AD}$  의 값은 Acceptor셀의  $F_A$  의 값으로 결정된다.

그러나, 결정하는 이류량에 대해 Donor셀에 Acceptor셀로 이류시킬 충분한 기체나 유체가 없는 경우가 생긴다. Fig. 3.11(a)는 이류면에서 기체를 이류시키는데 Donor셀에 충분한 기체가 존재하지 않는 경우이고, Fig. 3.11(b)는 이류면에서 유체를 이류시키는데 Donor셀에 충분한 유체가 존재하지 않은 경우이다.

구 분			Donor셀의 표면형상	이류량
이류면와 Donor셀의 표면이 수직	상류 차분	(a)		
		(b)		



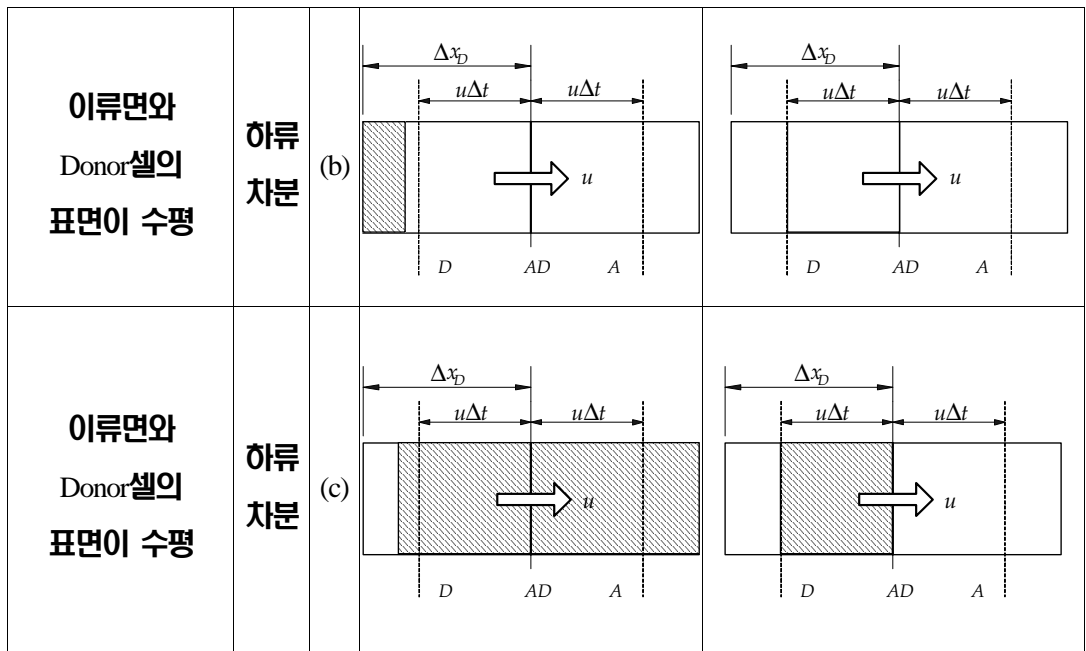
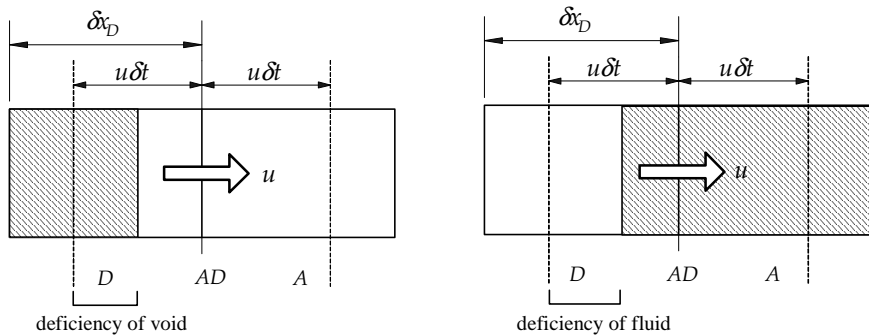


Fig. 3.10 Advection method of VOF function.

Fig. 3.11(a)의 경우 이류면에서  $F_{AD}$  를  $F_A$  로 취하면  $\Delta t$  시간 동안에 Donor셀로부터 Acceptor셀로 수송되는 기체의 이류량인  $(1 - F_A)V$  는 Acceptor셀이 보유하고 있는 기체량  $(1 - F_D)\Delta x_D$  보다 많은 기체가 이류하게 되고, Fig. 3.11(b)의 경우는 Acceptor셀이 보유한 유체량  $F_D\Delta x_D$  보다 많은 유체량이 이류되는 이상한 결과를 초래하게 된다.

따라서, Fig. 3.11(a)의 경우 기체의 부족분으로 유체를 이류시키고, 반대로 Fig. 3.11(b)의 경우는 유체의 부족분으로 기체를 이류시켜야 한다.



(a)

(b)

Fig. 3.11 Exception of advection computation.

이상을 모두 고려하고,  $x$ ,  $z$ 방향의 면적투과율과 셀내의 체적공극율을 고려하면 식 (3.32)의 이류면에서 VOF함수의 값은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$(-\Delta t u F)_{i-\frac{1}{2},k} = \text{sign}(C_x) \text{MIN} \left[ F_{AD} |C_x| + CFX, F_D \Delta x_D \right] \quad (3.44)$$

$$CFX = \text{MAX} \left[ (F_{DM} - F_{AD}) |C_x| - (F_{DM} - F_D) \Delta x_D, 0.0 \right] \quad (3.45)$$

$$(-\Delta t w F)_{i,k-\frac{1}{2}} = \text{sign}(C_z) \text{MIN} \left[ F_{AD} |C_z| + CFZ, F_D \Delta z_D \right] \quad (3.46)$$

$$CFZ = \text{MAX} \left[ (F_{DM} - F_{AD}) |C_z| - (F_{DM} - F_D) \Delta z_D, 0.0 \right] \quad (3.47)$$

여기서,

$$C_x = \Delta t u_{i-\frac{1}{2},k} \quad (3.48)$$

$$C_z = \Delta t w_{i,k-\frac{1}{2}} \quad (3.49)$$

$$F_{AD} = \begin{cases} F_D : \text{이류면과 Donor 셀의 표면이 수직} \\ F_A : \text{상기 이외} \end{cases} \quad (3.50)$$

$$F_{DM} = \text{MAX} \left[ F_{DMW}, F_D \right] \quad (3.51)$$

$$C \geq 0: DMW = i - 2, D = i - 1, A = i \quad (3.52)$$

$$C < 0: DMW = i + 1, D = i, A = i - 1 \quad (3.53)$$

식(3.44), 식(3.46)에서의  $MIN$  은 Donor셀이 보유하고 있는 유체 이상의 유체가 이루어지는 것을 방지하고, 식(3.45), 식(3.47)에서의  $MAX$  는 Acceptor셀이 보유하고 있는 기체 이상의 기체가 이루어지는 것을 방지함을 의미한다.

이와 같은 방법으로 모든 셀에 대하여 계산하면 계산상의 오차로 인하여 체적비율이 1보다 크거나 0보다 작은 셀이 생기게 된다. 계산이 끝난 후 이와 같은 체적비율을 가진 셀은 물리적으로 타당한 값을 가지도록 조정하여야 한다. 본 수치해석에서는 체적비율이  $10^{-6}$  보다 작은 곳은 0으로 조정하고  $1 - 10^{-6}$  보다 큰 곳은 1로 조정하여 계산을 수행하였다.

## 2.3 경계조건

### 2.3.1 자유수면에서의 경계조건

연속방정식을 만족시키는 셀을 유체셀로 한정하면, 표면셀의 경계면에 정의된 유속 중에 운동방정식의 계산영역이 되는 것은 유체셀과 접하는 경계면이다. 따라서, 표면셀과 표면셀, 표면셀과 기체셀 사이에 있는 경계면의 유속은 경계조건에 의해 결정되어야 한다.

표면에 수평한 유속경계조건은 표면셀의 자유수면의 형태( $NF$ )에 따라 인접한 유체셀의 경계면에서 유속을 표면셀 경계면의 유속으로 취한다. Fig. 3.12와 같은 표면셀( $i, k$ )는  $NF = 1$ 로, 셀의 왼쪽방향에 유체셀이 존재하므로 표면셀에서 표면과 수평한 유속  $w_{i,k+1/2}$ 는 계산영역인  $(i-1, k)$  셀에서 구한 유속  $w_{i-1,k+1/2}$ 의 값을 표면셀( $i, k$ )에서 수평방향의 유속  $w_{i,k+1/2}$ 로 취한다. 따라서,  $w_{i-1,k+1/2} = w_{i,k+1/2}$ 로 된다.

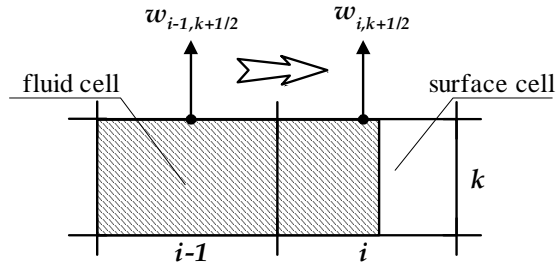


Fig. 3.12 Horizontal velocity boundary condition.

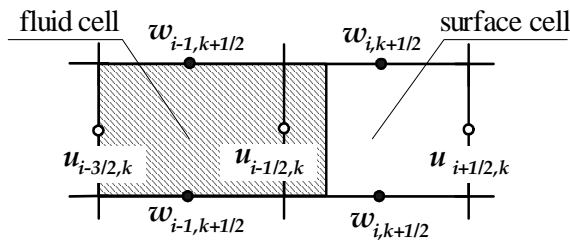


Fig. 3.13 Vertical velocity boundary condition.

표면에 수직한 유속은 표면셀의 형태에 따라 기체가 있는 방향의 셀경계면의 유속에 대해서 VOF함수  $F$ 의 이류를 계산할 때 표면셀에서 연속방정식이 만족되도록 결정된다. 즉, Fig. 3.13에서  $u_{i-1/2,k}$ 의 초기치는 표면셀에서 연속방정식이 만족되도록 주어지고, 이로부터  $u_{i-3/2,k}$ 의 값을 구하게 된다. 다음의 시간스텝에 대해서도 동일하게  $w_{i,k\pm 1/2}$ 의 값이 산정되므로 식(3.32)를 계산할 때 표면셀에서 연속방정식이 만족되도록  $u_{i-1/2,k}$ 의 값을 결정한다. 따라서, VOF함수  $F$ 의 이류계산의 결과로 표면위치가 변화하여 표면셀이 유체셀로 될 때에도 그 유체셀에 있어서 연속성은 보존된다.

### 2.3.2 개경계조건

개경계(Open boundary)는 Fig. 3.1에 나타내는 바와 같이 부가감쇠영역(Added dissipation zone)을 계산영역의 양끝에 두고, Stokes의 저항법칙에 기초하여 계산셀의 크기를 변화시키면서 다음의 식(3.54)와 같이 연직방향의 유속을 가상감쇠력(Fictions damping force)에 의해 서서히 감쇠시켜 파랑을 흡수하는 Hinatsu(1992)의 개경계처리기법을 적용하며, 도식화한 것은 Fig. 3.14와 같다.

$$f = -\beta w \quad (3.54)$$

여기서,  $\beta$ 는 파랑감쇠계수이다.

또한, 부가감쇠영역의 끝단에 유속이나 VOF함수 등의 물리량  $\Phi$ 의 수평변화가 이라는 다음의 조건을 부과한다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (3.55)$$

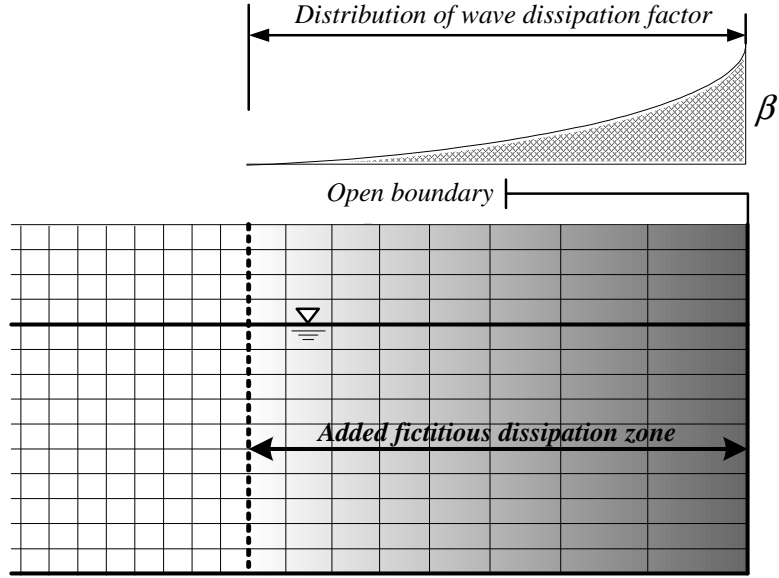


Fig. 3.14 Sketch of added fictitious dissipation zone.

### 2.3.3 조파조건

식(3.1)의 조파소스를 고려한 연속방정식은 우변에 Dirac delta 함수를 포함한  $\tilde{q}$ 의 항을 가지고 있다. 본 연구의 수치계산은 엇갈린격자를 채용하고 있으므로 셀경계면의 내에서 각 방향의 유속 ( $u, v, w$ )는 일정한 값을 가진다. 따라서, 식(3.1)의 연속방정식을 조파소스위치  $x = x_s$ 에서 하나의 셀  $\Delta x_s$ 에 대해 적분을 수행하면 식(3.56)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_x^{x+\Delta x_s} \int_y^{y+\Delta y_j} \int_z^{z+\Delta z_k} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dx dy dz \\ = \int_x^{x+\Delta x_s} \int_y^{y+\Delta y_j} \int_z^{z+\Delta z_k} q(y, z, t) \Delta(x - x_s) dx dy dz \end{aligned} \quad (3.56)$$

조파소스의 위치에서 Dirac delta 함수의 적분은  $\int_x^{x+\Delta x_s} \Delta(x - x_s) dx = 1$  이므로 최종적으로 식(3.57)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q(y, z, t) / \Delta x_s \quad (3.57)$$

따라서, 엇갈린격자를 이용하여 이산화할 경우에 조파소스를 주는 방법은  $x = x_s$  에서 조파소스강도  $q(y, z, t) / \Delta x_s$  를 고려하는 것으로 된다. 이 때, 식(3.57)의 우변항으로부터 격자길이의 차이에 따른 조파소스강도의 영향을 없애기 위하여 조파소스강도  $q$  에 조파시키고 싶은 유량밀도를 부여함으로써 기대한 파를 정확하게 조파할 수 있다.

조파소스에 의한 조파방법을 제안한 Brorsen and Larsen(1987)은 조파소스로부터 조파시킬 때 해석영역의 양쪽방향( $x$ 의 (+)방향과  $x$ 의 (-)방향)으로 파랑이 전달되기 때문에 식(3.58)과 같은 조파소스강도  $q$  를 제안하고 있다.

$$q = 2U_0 \quad (3.58)$$

여기서, 계수 2는 조파소스에 의한 파의 발생시에 해석영역의 양쪽방향으로 파의 진행을,  $U_0$  는 발생파의 수평유속성분을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 조파소스강도  $q$  로서 Stokes파의 3차근사이론에 의한 수평방향유속  $U_0$  를 적용한다. 단, 급작스러운 조파에 의해 자유수면의 거동이 불안정해지는 것을 방지하기 위하여 조파소스강도를 서서히 증가시키는  $\{1 - \exp(-2t / T)\}$  의 항을 도입하여 다음의 식과 같은 조파소스강도를 고려한다.

$$q = \begin{cases} \{1 - \exp(-2t / T)\} \cdot 2U_0 & t / T \leq 3 \\ 2U_0 & t / T > 3 \end{cases} \quad (3.59)$$

여기서,  $T$ 는 입사파의 주기이다.

식(3.59)에서  $\{1 - \exp(-2t / T)\}$  의 크기는 Fig. 3.15에 나타난 바와 같다.

본 연구에서와 같이 수치파동수로내에 구조물이 설치되는 경우에 조파소스의 위치로 구조물에 의한 반사파가 접근하는 경우는 조파소스의 위치에서 수위변동  $\eta_s$  와 조파소스에 의한 기대수위변동  $\eta_0$  가 서로 상이하게 된다. 따라서, 식(3.60)과 같이 조파소스강도가  $q = 2U_0$  로 될 수 없으므로 Ohyama and Nadaoka(1991)는 입사파와 반사파가 동시에

존재하는 경우에 대해 조파소스강도의 분포형상을 조파소스지점의 연속적분치가 반사파가 없는 경우와 분포형상이 상사되도록  $(\eta_0 + h) / (\eta_s + h)$  을 도입하여 다음의 식(3.60)을 고려하고 있다.

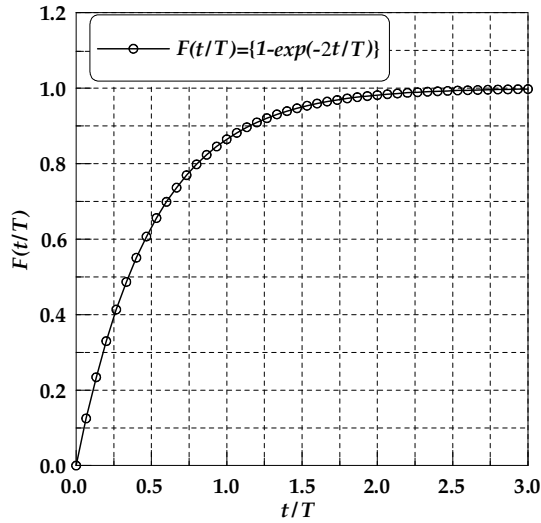


Fig. 3.15 Variation of wave source factor.

$$q = 2U_0 \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \quad (3.60)$$

따라서, 식(3.60)을 고려한 조파소스의 강도는 식(3.61)와 같이 주어진다.

$$q = \begin{cases} \{1 - \exp(-2t/T)\} \cdot 2U_0 (\eta_0 + h) / (\eta_s + h) & t/T \leq 3 \\ 2U_0 (\eta_0 + h) / (\eta_s + h) & t/T > 3 \end{cases} \quad (3.61)$$



### 2.3.4 안정조건

본 연구에서는 수치계산의 안정성을 확보하기 위하여 이류항으로부터 생기는 CFL (Courant-Freindrichs-Lewy)조건과 점성항으로부터 생기는 확산불안정조건(Diffusion instability condition)을 이용하였다.

CFL조건은 식(3.62)의 Courant수가 만족되어야 한다.

$$C = \frac{|\hat{V}| \Delta t}{\Delta x} \quad (3.62)$$

여기서,  $\hat{V}$  는 유속을,  $\Delta x$  는 격자간격이다.

Courant수의  $c$  가  $c < 1$  인 경우에 수치계산의 안정성이 확보될 수 있다. 이것은 1회의 시간스텝 사이에 어떤 변수를 운반한 거리  $|\hat{V}| \Delta t$  가 공간의 이산폭인  $\Delta x$  를 초과할 수 없다는 것을 의미한다. 전술한 Donor-acceptor 법은 이류에 의해 이동하는 VOF함수  $F$  의 값이 Donor셀과 Acceptor셀의  $F$ 값에 의해 결정되는 방법이므로 Courant수의  $c$ 는  $c < 1$  이어야 한다. 따라서, 시간스텝의 간격  $\Delta t$  는 식(3.62)에 의해 식(3.63)를 만족하여야 한다.

$$\Delta t < \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u_{i,j,k}|}, \frac{\Delta y}{|v_{i,j,k}|}, \frac{\Delta z}{|w_{i,j,k}|} \right\} \quad (3.63)$$

또한, 확산불안정조건(Diffusion instability condition)에 대해서는 식(3.64)를 만족하여야 한다.

$$\nu \Delta t < \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta x_i^2 \Delta y_j^2 \Delta z_k^2}{\Delta x_i^2 + \Delta y_j^2 + \Delta z_k^2} \right\} \quad (3.64)$$

본 수치계산에 있어서 초기의 시간스텝은  $\Delta t = T / 100$  로 하고, 그 이후는 Courant조

건식(3.63) 및 Diffusion조건식 (3.64)가 만족되도록 시간스텝의 간격  $\Delta t$  를 매 시간스텝마다 조정하였다.

### 2.3.5 그 외의 경계조건

이상의 경계조건 이외에도 적용되어야 할 경계조건으로는 구조물의 표면 및 바닥에서 연직방향의 유속이 0인 불투과조건을 적용하였고, 점성유체를 대상으로 하고 있기 때문에 Non-slip조건을 적용하는 것이 일반적이나, 격자간격을 구조물의 표면이나 바닥의 근방에서 형성되는 경계층의 두께까지 세세하게 분할하고 있지 않기 때문에 Slip조건을 채용하였다. 그리고, 계산의 수렴판정기준은 Poisson 방정식에서 계산한 값이 연속방정식을  $10^{-4}$  범위로 전 계산영역에서 만족하는 것으로 하였다.

## 2.4 수치계산의 흐름

지금까지 기술한 수치파동수로에 의한 파동장의 해석에 있어서 전체적인 수치계산의 흐름을 Fig. 3.16에 나타내며, 이를 아래에 기술한다.

- (1)수심, 파랑의 입사조건, 연직주상구조물의 기하학적인 형상 등과 같은 초기조건을 입력.
- (2)경계조건을 만족하도록 식(3.2)~식(3.4)의 운동방정식을 계산하고 다음의 시간스텝에 있어서 유속을 계산.
- (3)운동방정식으로부터 얻어진 유속의 값이 일정한 값으로 수렴될 때까지 식(3.1)의 연속방정식을 만족하도록 유속과 압력을 조정하여 반복계산을 수행.
- (4)연속방정식을 만족하는 유속의 값을 적용하여 식(3.30)의 VOF함수  $F$ 에 관한 이류 방정식을 계산.
- (5)계산된 VOF함수  $F$ 를 이용하여 자유표면의 형상을 결정.

(6) 각 시간스텝에 대해 반복.

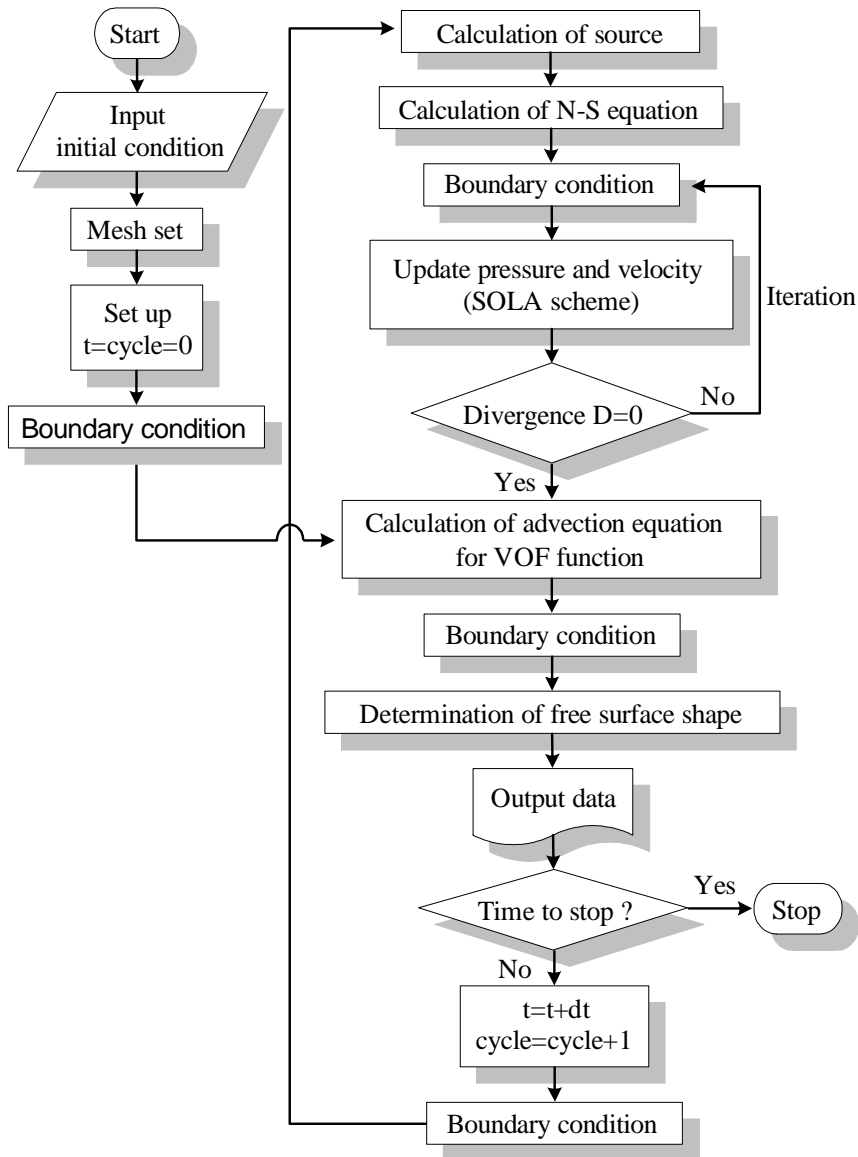


Fig. 3.16 Flow chart of computational procedure.

### 3. 수치해석결과와 검증

#### 3.1 조파파형

본 연구에서 적용하고 있는 조파기법에 의한 조파방법의 타당성을 검토하기 위하여 수심  $h=35\text{cm}$ 를 갖는 3차원파동장에 있어서 파고  $H=6\text{cm}$ , 주기  $T=1.0\text{s}$ 를 입사파조건으로 하여 계산된 공간수위분포의 일례를 Fig. 3.17에 나타낸다. Fig. 3.17을 살펴보면 계산영역 내( $0.0 \leq x/L \leq 4.0$ ,  $0.0 \leq y/L \leq 4.0$ )에는 안정적인 파가 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 3.18은 개경계에서 발생할 수 있는 파랑의 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 방지하기 위하여 수치파동수로의 양 끝단에 설치된 부가감쇠영역(Hinatsu, 1992)에서 파랑의 소파성능을 살펴본 것으로, Fig. 3.17과 동일한 수치파동수로 및 입사파를 조건으로 하여  $y/L=2.0$ 에서 계산된 수위의 공간분포를 부가감쇠영역을 포함한 전 계산영역에 대하여 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 개경계에서 발생하는 반사파는 부가감쇠영역( $3.0 \leq x/L \leq 4.0$ ,  $4.0 \leq x/L \leq 7.0$ )에서 기대한 파랑의 감쇠로 충분한 소파효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 계산영역내( $0.0 \leq x/L \leq 4.0$ )에서 수위의 공간분포를 목표로 하는 Stokes 3차파의 공간분포와 비교하면 본 연구의 계산파형은 목표로 하는 파형과 매우 잘 일치할 뿐만 아니라, 원하는 파를 만족스럽게 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

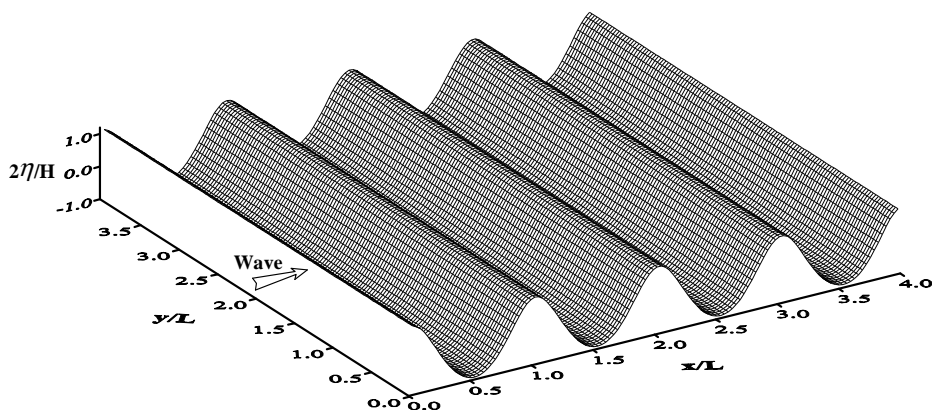


Fig. 3.17 Spatial distribution of water level.

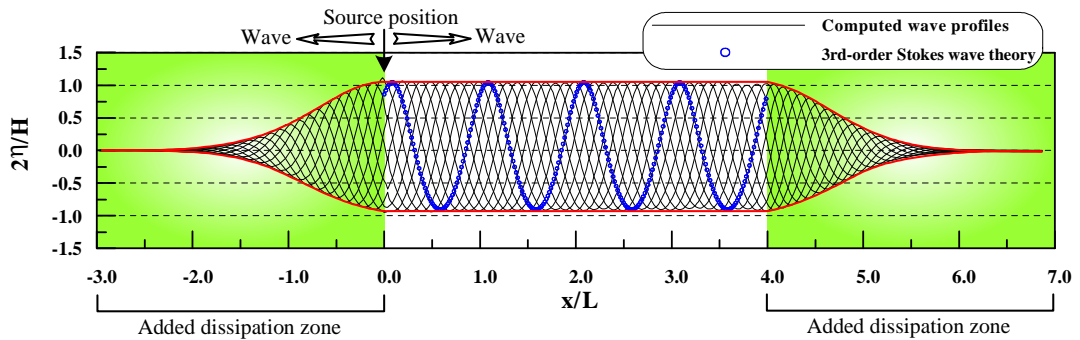


Fig. 3.18 Spatial distribution of computed and target wave profiles at each time.

## 3.2 파랑변형

3차원파동장에 설치된 연직원주구조물과 파랑과의 비선형간섭에 따른 연직원주구조물 주변의 파랑변형에 대하여 해석해 및 2차오더의 회절산란포텐셜을 유도한 眞田(1998)의 수치해석결과 및 수리실험결과와 본 수치해석결과를 비교·검토한다.

Fig. 3.19는 비교에 적용된 3차원수치파동수로 및 연직원주구조물의 제원을 나타내며, 이 때 수치파동수로의 수심은  $h=45\text{cm}$ 로 일정하며, 입사파고  $H=3\text{cm}$ , 입사주기  $T=1.0\text{s}$ 에 대하여 수치계산을 수행하였다. 초기계산의 시간스텝은  $\Delta t=0.01\text{s}$ 로 하고, 그 이후는 CFL(Courant-Fredrichs-Lewy)조건 및 Diffusion(Diffusive time limit condition)조건이 만족되도록 시간스텝의 간격을 매 시간스텝마다 자동으로 조정되도록 하였다. 그리고, 수치계산에서는 개경계에서 발생할 수 있는 파랑의 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 방지하기 위하여 부가감쇠영역을 설치하며(Hinatsu, 1992), 부가감쇠영역의 길이는 입사파장  $L$ 의 2배 이상으로 하였다.

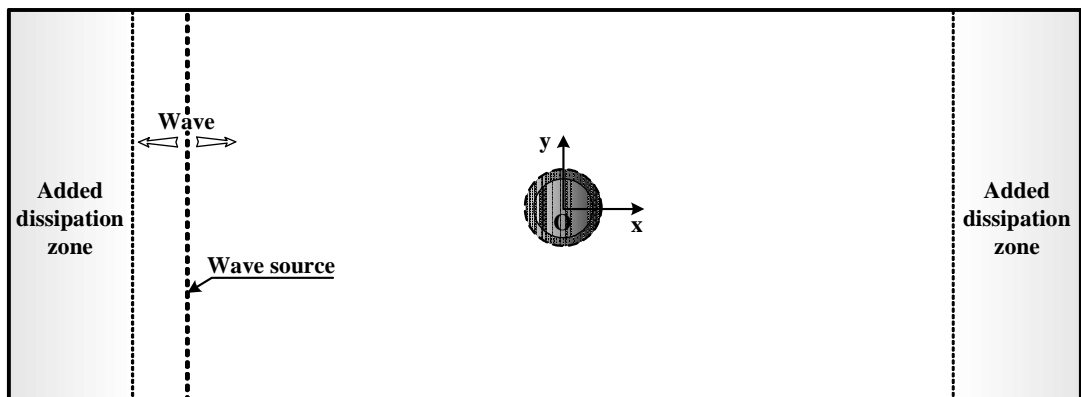
$x$ 축을 따른  $y=0$ ,  $y=25\text{cm}$ 의 위치 및 연직원주구조물의 주위에서 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H(\eta_{\max}$ 는 최대수위값)의 공간분포에 대하여 眞田(1998)의 수치해석결과 및 수리실험결과와 비교한 본 계산결과를 Fig. 3.20 및 Fig. 3.21에 각각 제시하였다. 연직원주구조물의 주위에서  $2\eta_{\max}/H$ 의 측정위치는 Fig. 3.21에 나타내는 바와 같이 반시계방향을 기준으로 하였다. 여기서, 점선과 사각형의 점은 眞田(1998)의 수치해석결과와 수리실험결과를 각각 나타내며, 본 연구의 수치해석결과를 실선으로 나타내었다. Fig. 3.20에서 본 연구의 해석결과를 살펴보면 원주구조물의 전면에서 구조물에 의해 반사되는 회절산

란파와 입사파의 중첩에 의한 부분중복파랑이 형성되고, Fig. 3.20(a)에서 무차원최대수면 상승고는 원주 전면의 표면에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. Fig. 3.20에서 주어지는 결과는 眞田(1998)의 수치해석결과보다 실험치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 그리고, Fig. 3.21에서 주어지는 결과를 살펴보면 원주구조물의 배후( $0^\circ \leq \theta < 60^\circ$ )에서는 본 연구의 수치해석결과가 수리실험결과보다 작은 값을 나타내지만, 眞田(1998)의 수치해석결과보다 실험치를 잘 재현하고 있으며, 그 외의 범위( $60^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ )에서는 수리실험결과와 거의 동일한 값을 나타내고 있다. Fig. 3.22는 수치파동수로의 수심  $h=45\text{cm}$ , 입사파고  $H=8\text{cm}$ , 입사주기  $T=1.0\text{s}$ 에 대하여 수치계산을 수행하였고, 원주의 주변에서 파랑변형을 眞田(1998)의 실험결과와 수치해석결과 및 제 2장에서 언급한 村上(1993)의 수치해석결과와 각각 비교한 것이다.

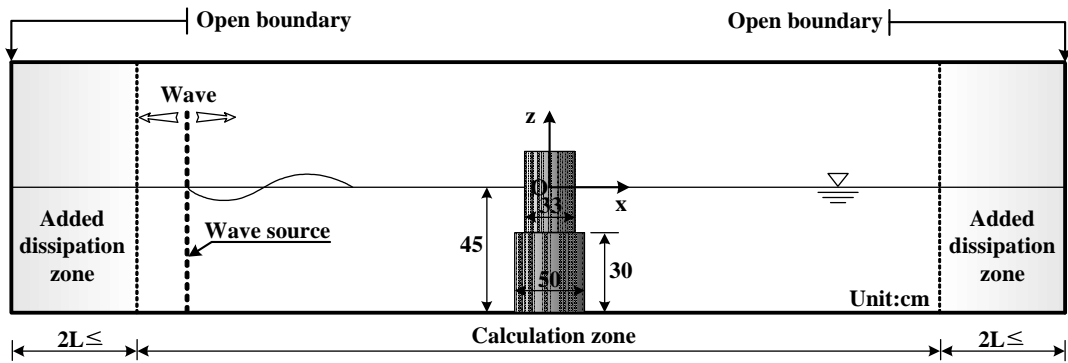
구조물 주변의 파랑변형에 있어서 眞田(1998)의 수리실험결과와 비교한 결과, 구조물의 전후면( $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=180^\circ$ )의 부근에서는 村上(1993)의 방법에 의한 수치해석결과가 수리실험결과와 약간 차이가 나타나고 있지만,  $30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$  부근에 있어서는 수리실험결과와의 차는 眞田(1998)의 수치해석결과와 수리실험결과에 있어서의 차이와 비슷하게 형성되고 있다.

각각의 수치해석결과와 수리실험결과를 비교한 결과, 본 장에서의 해석결과가 眞田(1998)의 수리실험결과 잘 일치하고 있다.

이상의 파랑변형에 대한 본 연구의 수치해석결과는 眞田(1998)의 수치해석결과와 제 2장에서 언급한 村上(1993)의 수치해석결과보다 잘 재현하고 있으며, 그 정도는 매우 높은 것으로 판단된다.

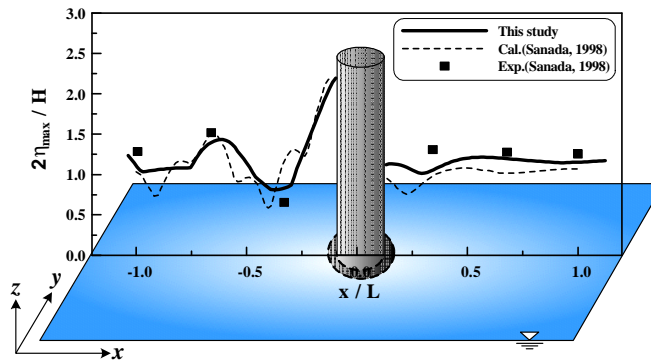


(a) Plan view

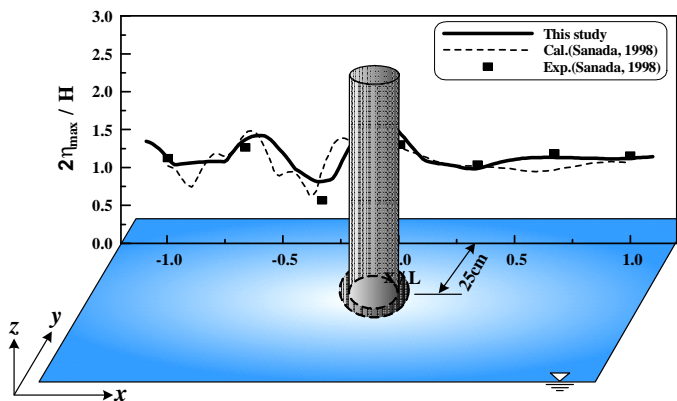


(b) Side view

Fig. 3.19 Definition sketch of 3D numerical wave channel for comparison of wave transformations.



(a)  $y=0\text{cm}$



(b)  $y=25\text{cm}$

Fig. 3.20 Comparison of spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$

along x-axis( $H/L=0.02$ )

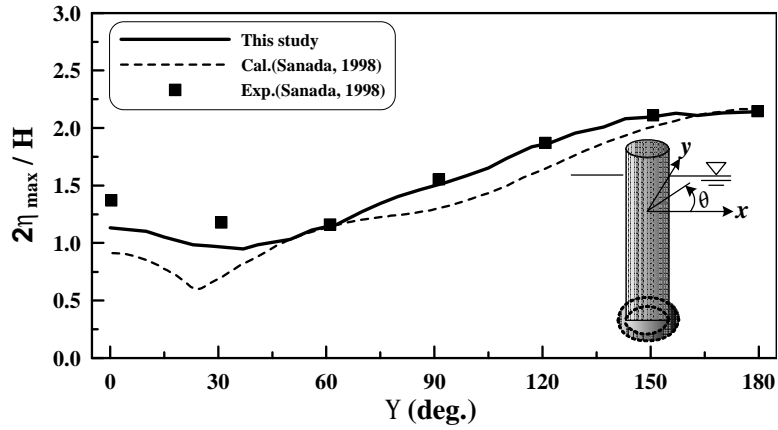


Fig. 3.21 Comparison of spatial distributions of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$  around vertical column( $H/L=0.02$ )

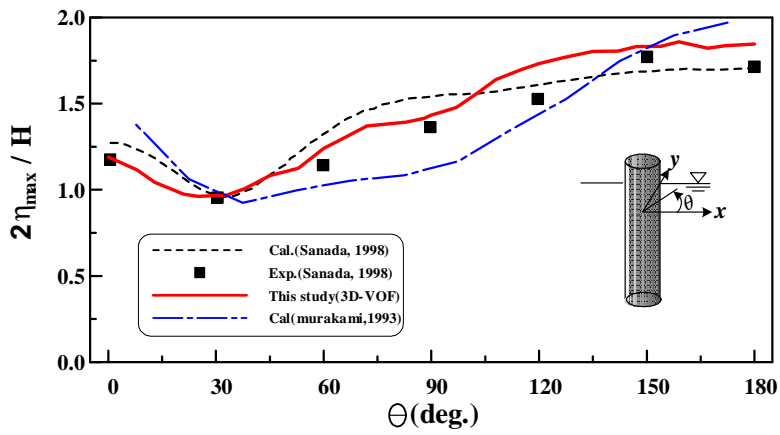


Fig. 3.22 Comparison of spatial distributions of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$  around vertical column( $H/L=0.053$ )



### 3.3 파력

다음으로, 연직원주구조물에 작용하는 파력특성에 대하여  $h/a=1.16$ ( $a$ 는 연직원주구조물의 반경),  $H/a=0.232$ 인 경우에 기존의 수리실험결과(Chakrabarti and Tam, 1975) 및 수치해석결과(喜岡와 石田, 1984; 村上 등, 1993)와 본 연구의 수치해석결과를 비교·검토한다. Fig. 3.23는 해석에 이용된 연직원주구조물의 재원을 나타내며, 무차원최대파력  $F_{\max}/\rho g a^2 (H/2)$ 에 대하여 기존의 수리실험 및 수치해석결과와 비교한 것을 Fig. 3.24에 제시하였다. 결과를 살펴보면 실험치가 주어져 있는  $ka>0.7$ ( $k$ 는 파수,  $k=2\pi/L$ )의 범위에서는 본 연구의 수치해석결과는 수리실험결과를 잘 재현하고 있는 것으로 판단되며, 기존의 해석법과 현저한 차이를 나타내고 있지 않다. 그러나, 실험치가 주어지지 않은  $ka<0.5$ 의 범위에서는  $ka$ 의 감소에 따라 喜岡와 石田(1984)의 해석결과는 감소하는 경향을 나타내며, 제 2장에서 언급한 村上 등(1993)의 결과는 Stokes 2차파이론의 적용범위를 초과하므로 발산하고 있다. 이는  $ka<0.5$ 의 범위는  $D/L<0.2$ 인 항력이 지배적인 소형구조물의 영역으로 기존의 해석법으로 파력을 산정하는 데는 다소 무리가 있으며, 항력과 관성력을 동시에 고려할 수 있는 Navier-Stokes의 운동방정식에 근거한 본 연구의 수치해석결과가 타당한 것으로 판단된다.

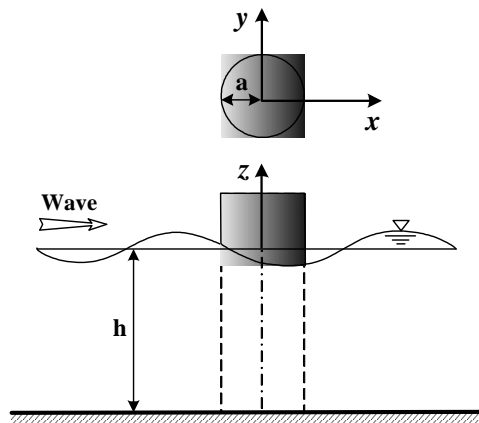


Fig. 3.23 Definition sketch for comparison of wave forces acting on the vertical column.

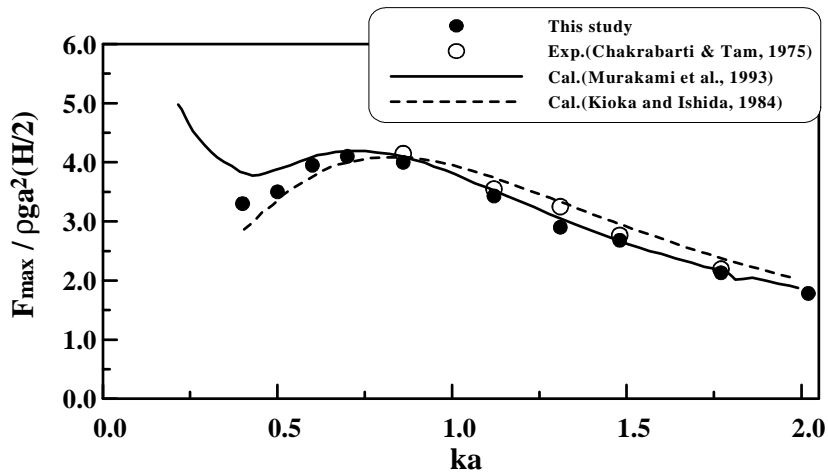


Fig. 3.24 Comparison of non-dimensional maximum wave forces  $F_{\max}/\rho g a^2(H/2)$  acting on the vertical column.

이상의 3차원파동장에 설치된 연직원주구조물과 파랑과의 비선형간섭에 의한 파랑변형 및 구조물에 작용하는 파력의 수치해석결과가 기존의 해석결과보다 실험치를 잘 재현하고 있는 것으로 판단되므로 본 연구의 타당성이 검증된다. 이를 근거로 하여 원형 및 정사각형의 단면형상을 갖는 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형의 특성을 이후에서 검토한다.

## 4. 수치해석결과

### 4.1 단수연직주상구조물

수심 35cm의 3차원파동장에 설치된 원형 및 정사각형의 단면형상을 갖는 Fig. 3.25의 단수연직주상구조물을 대상으로 구조물의 주변에서 비선형파랑변형의 특성을 입사파랑의 제원과 관련하여 검토한다. 여기서,  $\theta$ 는 파진행방향에 대하여 구조물의 전면에서 반시계방향으로 측정된 각도,  $D$ 는 원형단면의 직경,  $B$ 는 정사각형단면의 폭을 각각 나타낸다. 입사파랑조건 및 연직주상구조물의 제원을 다음의 Table 3.2에 제시한다.

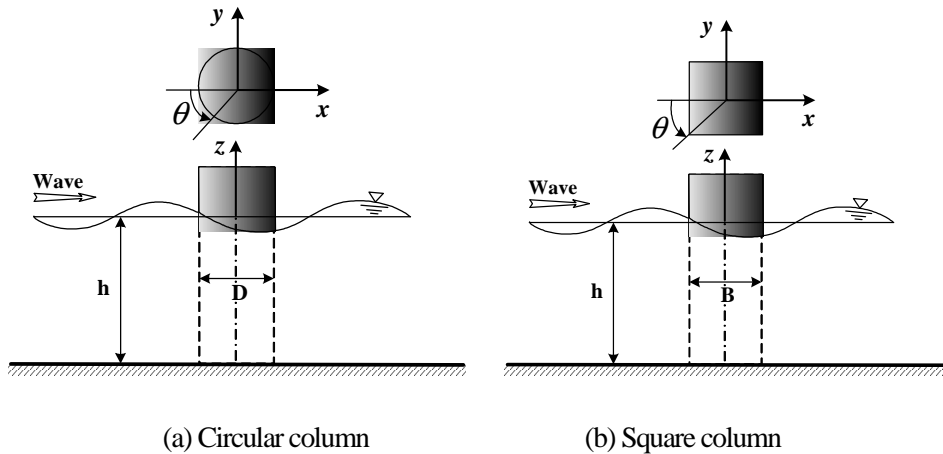


Fig. 3.25 Numerical model of vertical column.

Table 3.2 Conditions of numerical analysis for single vertical column.

Shape of structure	$T(s)$	$H(cm)$	$h(cm)$	$D, B(cm)$	$H/L$	$D/L, B/L$
Circular column	0.8	6	35	60	0.061	0.62
	1.0	3			0.021	0.42
		6			0.042	
		9			0.063	
		6			0.032	0.32
Square column	0.8	6	35	60	0.061	0.62

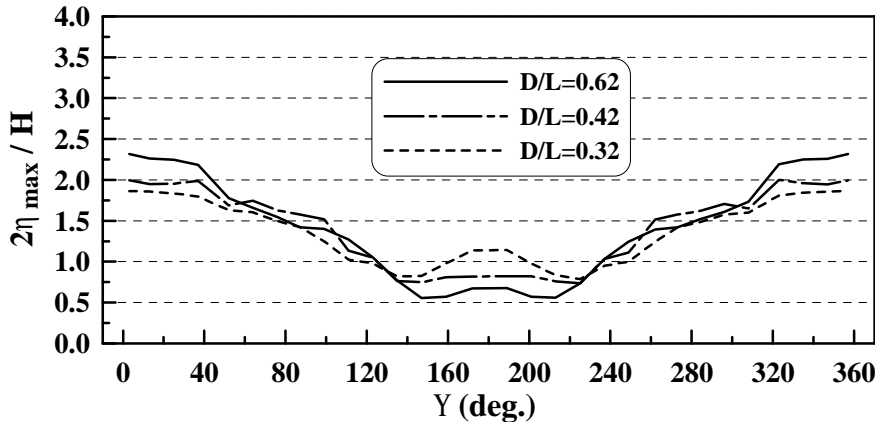
Square column	1.0	3	35	60	0.021	0.42
		6			0.042	
		9			0.063	
	1.2	6			0.032	0.32

Fig. 3.26은 입사파향각  $\alpha = 0^\circ$ , 입사파고  $H=6\text{cm}$ 의 경우에 대하여 연직주상구조물의 직경(폭)과 입사파의 파장과의 비율( $D/L$ ,  $B/L$ )에 따른 구조물의 표면둘레에서 무차원최대 수면상승고의 변화를 나타낸 결과이며, Fig. 3.26(a)는 원형단면, Fig. 3.26(b)는 정사각형의 단면에 대한 경우이다. Fig. 3.26(a)의 원형단면의 경우 입사파와 회절반사파에 의한 부분 중복파로 구조물의 전면( $\theta \approx 0^\circ, 360^\circ$ )에서 가장 큰 수면상승고를 나타내고, 가 증가함에 따라 감소하다가 구조물의 후면( $140^\circ \leq \theta \leq 220^\circ$ )에서 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 무차원최대수면상승고는 구조물의 전면에서는  $D/L$ 이 클수록, 구조물의 후면에서는  $D/L$ 이 작을수록 크게 나타난다. Fig. 3.26(b)의 정사각형단면에 대해서는  $B/L$ 이 0.62, 0.42일 때는 구조물의 전면( $\theta \approx 0^\circ, 360^\circ$ )에서 최대수면상승고가 나타났으며,  $B/L$ 이 0.32인 경우는  $\theta \approx 30^\circ$ 의 부근에서 최대수면상승고가 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 구조물의 후면( $140^\circ \leq \theta \leq 220^\circ$ )에서 회절파로 인한 수면상승고가 증가되며, 이러한 경향은  $B/L$ 이 작을수록 크게 나타나고 있다. 이러한 원인은 주기가 짧은 경우 구조물의 전면에서 파랑에너지의 회절반사가 탁월하고, 주기가 긴 경우 구조물의 배후로 파랑에너지의 전달이 크게 된 결과로 판단된다.

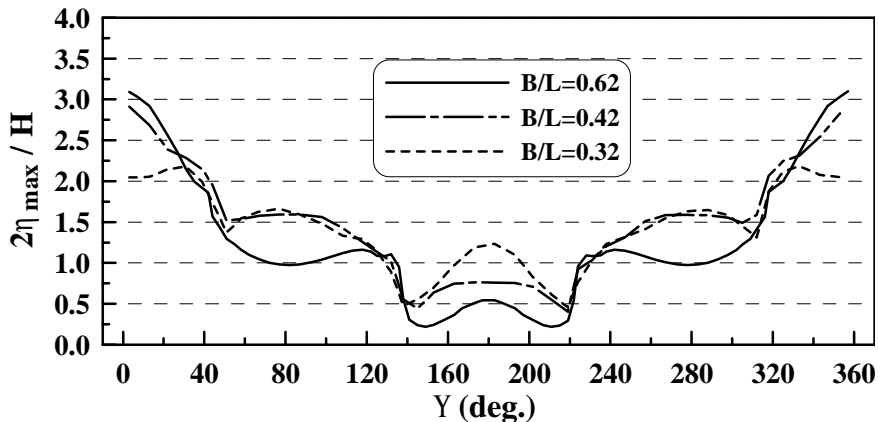
전체적으로 원형단면에 비해 정사각형단면을 갖는 주상구조물이 입사파의 주기변화에 따라 구조물에 의한 회절파의 영향으로 구조물의 표면에서 더욱 복잡한 수면상승고를 보이고 있으며, 상대적으로 큰 수면상승고를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 3.27은 입사파의 주기가  $T=1.0\text{s}$ 인 경우에 있어서 원형단면과 정사각형단면의 연직주상구조물에 대하여 파형경사  $H/L$ 의 변화에 따른 구조물의 표면에서 무차원최대수면상승고의 변화를 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 Fig. 4.27(a)의 경우  $40^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$ ,  $260^\circ \leq \theta \leq 320^\circ$ 의 범위에서는 파형경사가 증가함에 따라 수면상승고가 작게 나타나고 있으며, 그 이외의 범위에서는 파형경사의 변화에 따른 무차원수면상승고의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. Fig. 3.27(b)의 경우 원형단면의 연직주상구조물과 비슷하게 구조물의 측면( $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ )과 후면( $140^\circ \leq \theta \leq 220^\circ$ )에서 파형경사가 증가함에 따라 수면상승고가 작

게 나타나고 있으나, 그 차이는 미소함을 알 수 있다. 이러한 원인은 파의 비선형성이 커질수록 구조물과 파랑과의 비선형간섭으로 인하여 수면상승고가 작게 나타나는 것으로 판단되며, 전체적으로 단면형상에 따라 수면상승고의 경향은 상이하나, 파형경사의 변화에 따른 수면상승고의 차이는 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.



(a) Circular column

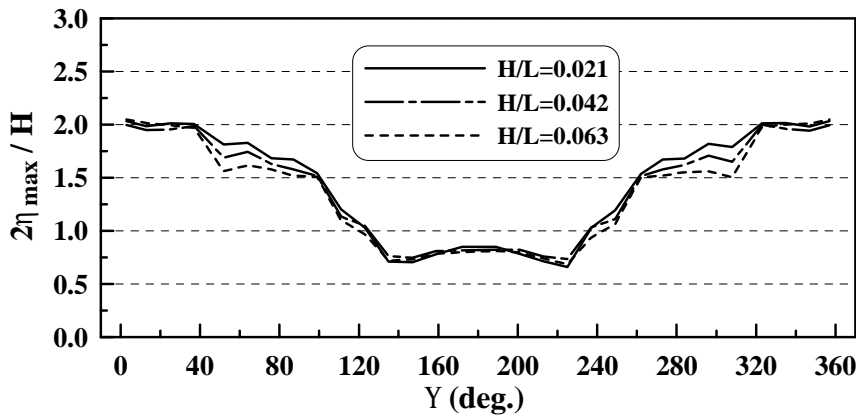


(b) Square column

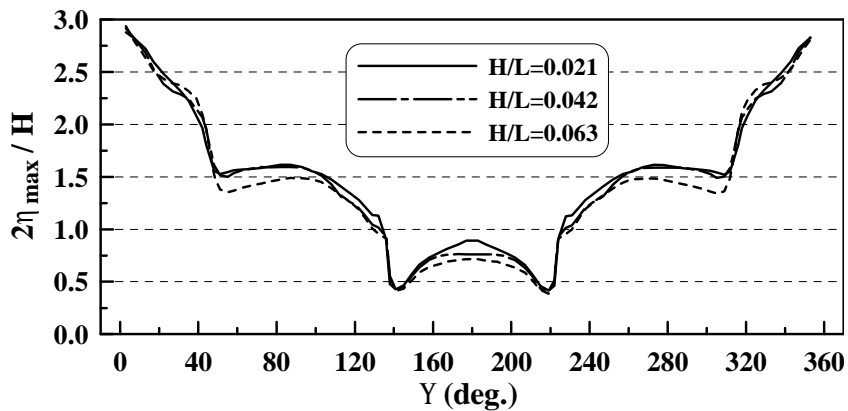
Fig. 3.26 Distributions of non-dimensional maximum water level  $2\eta_{max}/H$  around vertical column.

Fig. 3.28는  $D(B)/L=0.42$ ,  $H/L=0.042$ 의 경우 단수연직주상구조물의 주변에 있어서 무차원최대수면상승고의 공간분포를 나타낸 것으로, Fig. 3.28(a)는 원형단면, Fig. 3.28(b)는 정사각형단면의 연직주상구조물에 대한 결과이다. 전술한 바와 같이 구조물의 전면에서는 입사파와 회절반사파의 중첩으로 인한 부분중복파가 형성되어 큰 수면상승고가 나타나

며, 구조물의 배후에서는 구조물로 인한 에너지의 수평분산으로 작은 수면상승고를 나타내고 있다. 또한, 정사각형단면의 경우 우각부의 주위에서 파의 회절산란이 복잡하게 형성되어 원형단면의 연직주상구조물의 경우와는 약간 상이한 수면상승고의 공간분포를 나타내고 있다.

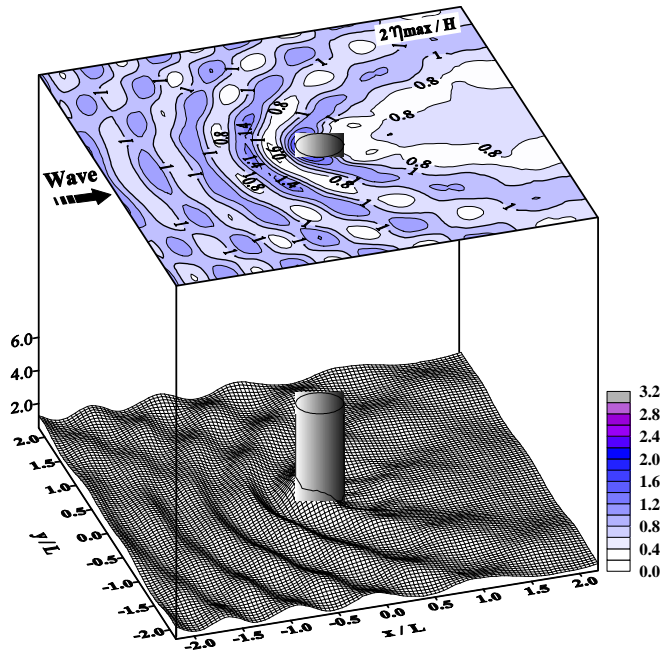


(a) Circular column( $D/L=0.42$ )

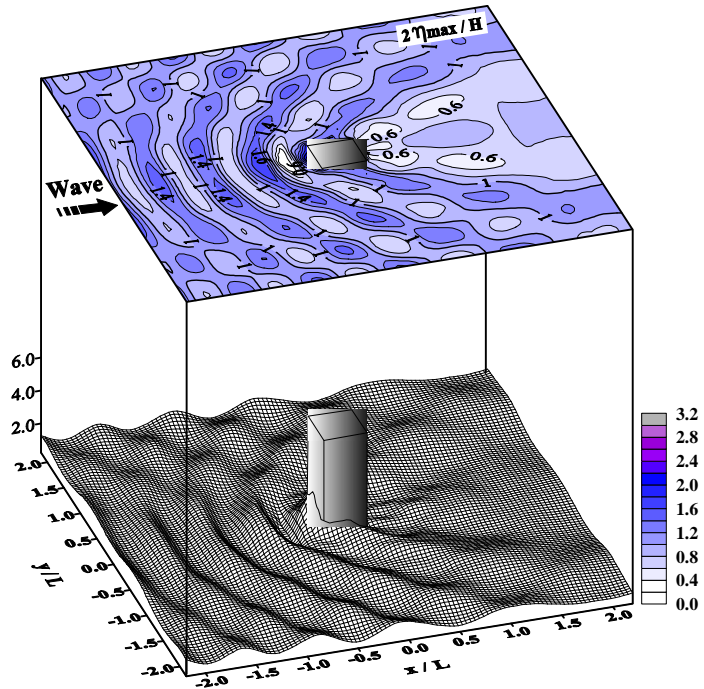


(b) Square column( $B/L=0.42$ )

Fig. 3.27 Distributions of non-dimensional maximum water level  $2\eta_{max}/H$  around vertical column.



(a) Circular column( $D/L=0.42$ )



(b) Square column( $B/L=0.42$ )

Fig. 3.28 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$   
for vertical column( $H/L=0.042$ ).

#### 4.2 원형단면의 복수연직주상구조물

3차원파동장에 설치된 원형단면형상을 갖는 Fig. 3.29의 복수연직주상구조물을 대상으로 구조물의 배치간격  $e/D$  및 입사파향각  $\alpha$ 의 변화에 따른 구조물에 작용하는 비선형 파력 및 구조물에 의한 주변파동장의 비선형특성변화를 고찰한다. 수치해석에 적용한 입사파조건 및 연직주상구조물의 제원을 다음의 Table 3.3에 제시하며,  $e$ 는 구조물간의 거리를 나타낸다.

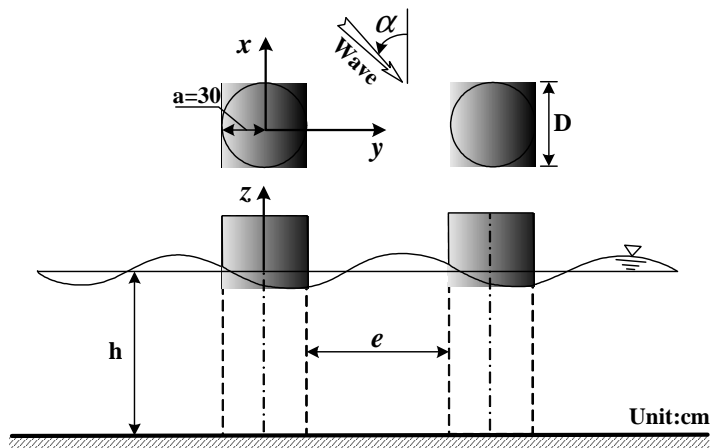


Fig. 3.29 Numerical model of dual vertical columns with circular section.

Table 3.3 Conditions of numerical analysis for circular column.

Shape of structure	$T(s)$	$H(cm)$	$h(cm)$	$D(cm)$	$H/L$	$e/D$	$\alpha(^{\circ})$
Circular column	1.4	6	30	60	0.028	1.0, 3.0	0
	1.0	6	30	60	0.044	1.0, 3.0	
	1.0	6	35	60	0.042	0.25~4.0	



Circular column	1.0	6	35	60	0.042	0.25~4.0	45
							90

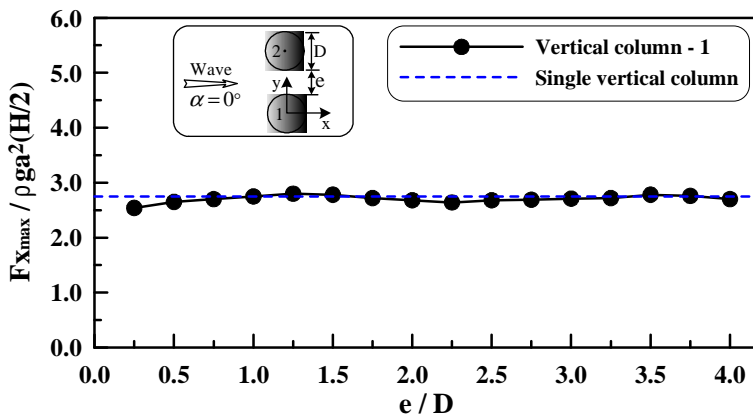
#### 4.2.1 입사파향각 $\alpha = 0^\circ$

Fig. 3.30은 입사주기  $T=1.0s$ , 수심  $h=35cm$ , 입사파향각  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에 파진행방향 우측에 설치된 구조물 1을 대상으로 구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$  및  $y$ 방향성분  $F_y$ 의 최대값의 변화를 구조물의 배치간격  $e/D$ 를 파라미터로 나타낸 결과이다. 전체적으로  $F_x$ 의 변화에 미치는 구조물의 배치간격의 영향은 크게 없는 것으로 판단되며, 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화는 단수연직주상구조물의 경우에 대한  $F_x$ 의 값을 중심으로 변동하고, 일정거리 이상이 되는 곳에서는 단수연직주상구조물의  $F_x$ 와 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 그리고, 구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 는  $F_x$ 와 비교하여 구조물의 배치간격에 상대적으로 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.  $F_y$ 의 최대값은 구조물의 배치간격이 가장 좁은  $e/D=0.25$ 에서 나타나고, 이후 감소하다가 구조물간의 거리  $e$ 가 입사파장  $L$ (약 150cm)에 대해 약  $e \approx 1.0L$ 이 되는  $e/D=2.5$ 의 부근에서는  $F_y$ 의 값이 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 구조물에 의한 회절파의 영향과 구조물간의 간섭현상으로 구조물간의 내부파동장에 형성되는 부분중복파의 영향이 공진현상으로 발생한 결과로 판단된다.

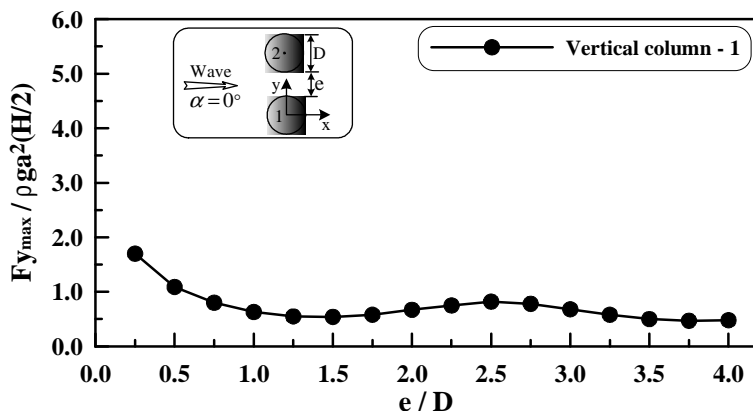
이와 같은 구조물의 배치간격에 따른 파력의 변화특성을 보다 상세히 살펴보기 위하여 구조물의 배치간격이  $e/D=0.25$ ,  $e/D=1.5$ ,  $e/D=2.5$ 인 경우에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 Fig. 3.31에 제시한다. 전체적으로 구조물의 전면에서 입사파와 회절반사파의 중첩에 의한 부분중복파는 구조물의 배치간격에 따라 상이하게 나타나며, 수면상승고는 구조물의 전면이 구조물의 배후면에 비해 보다 높은 값을 나타내고 있다. 그리고, 구조물의 내측에서는 구조물의 배치간격에 따라 수면상승고의 공간변화가 복잡하게 나타나며, 특히 구조물의 배치간격이 가장 좁은 Fig. 3.31(a)의 경우에서 가장 복잡한 수면상승고가 나타난다. 또한, Fig. 3.31(c)의 경우에는 내측의 전 단면에 걸쳐 높은 수면상승고가 형성되며, 구조물의 내·외측에서 수면상승고의 차이도 크게 되는 것을 알

수 있다. 이와 같은 결과로부터 연직주상구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격에 따른 파랑에너지 전달과 구조물에 의한 회절산란파의 영향으로 형성되는 내부 파동장의 변화에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 3.32은 파진행방향에 대하여 우측에 설치된 구조물 1의 우측면과 좌측면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 결과로,  $e/D=0.25$ ,  $e/D=1.5$ 의 경우이다. 그림을 살펴보면 구조물의 배치간격이 좁은 Fig. 3.32(a)의 경우에 구조물 1의 좌측에서 높은 수면상승고가 나타나고, Fig. 3.32(b)의 경우는 구조물의 좌·우측면에서 수면상승고의 차이가 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고, 구조물 1의 우측면과 좌측면에서 측정되는 수면상승고에 위상차이가 발생하며, 구조물의 배치간격이 좁은 Fig. 3.32(a)의 경우가 구조물 1의 우측면과 좌측면에서의 수면상승고에 대한 차이가 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다.

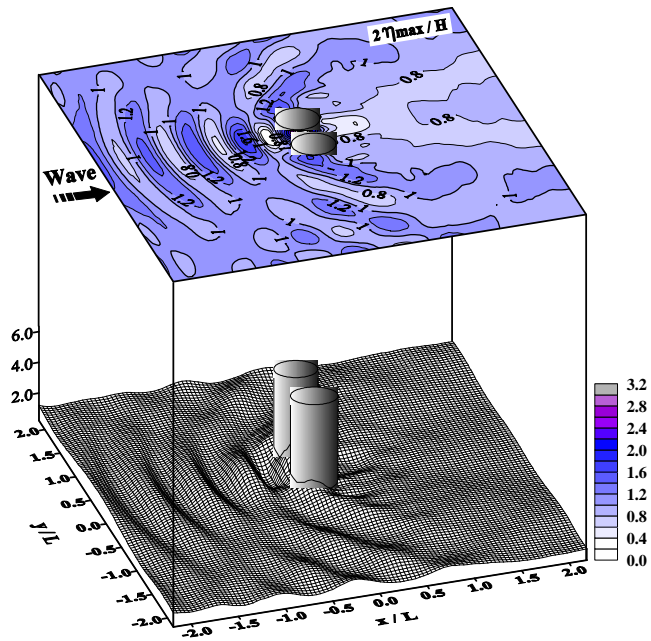


(a)  $x$ -directional wave force components

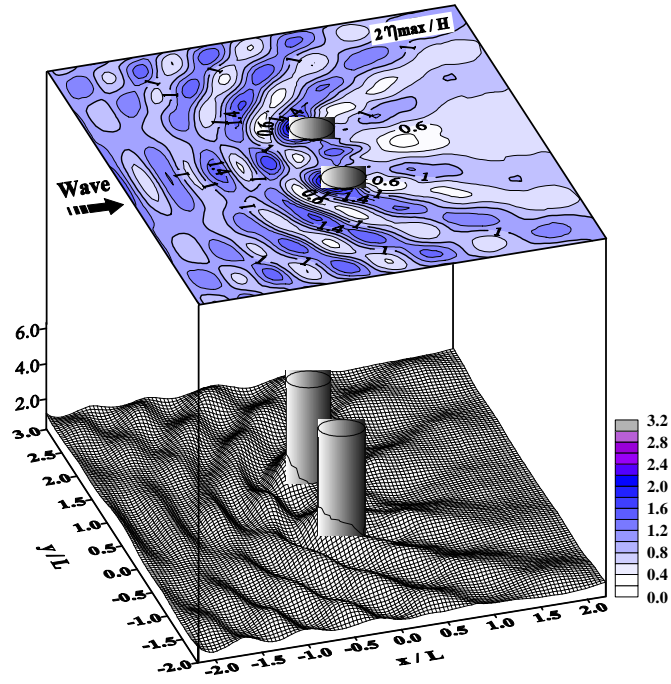


(b)  $y$ -directional wave force components

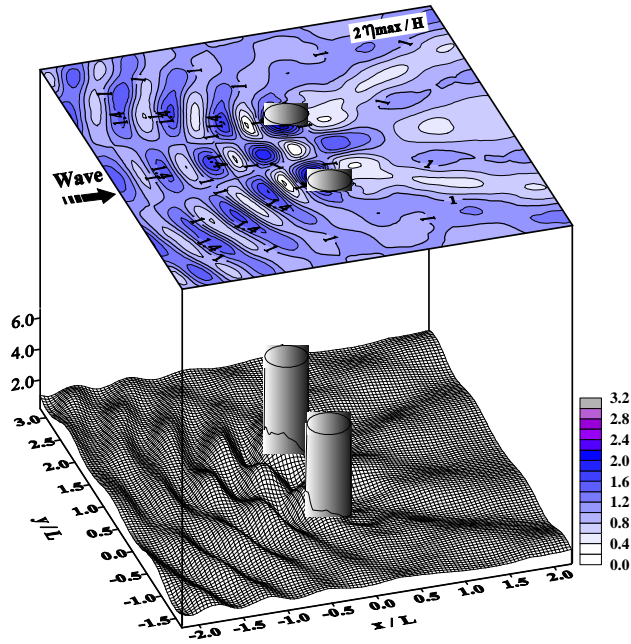
Fig. 3.30 Variation of maximum wave force components acting on vertical column 1 with circular section.



(a)  $e/D=0.25$



(b)  $e/D=1.5$



(c)  $e/D=2.5$

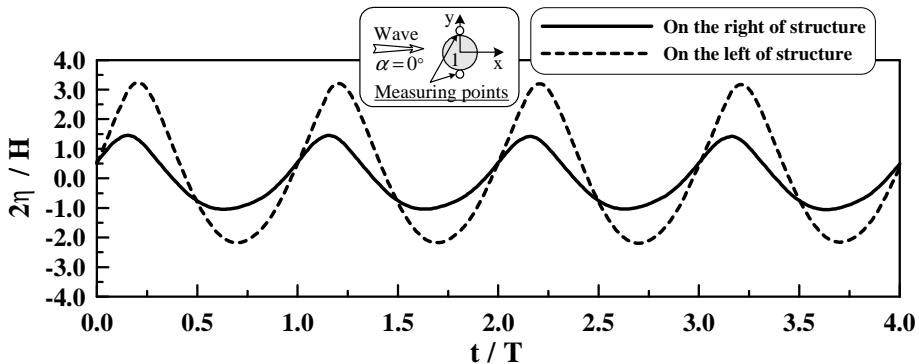
Fig. 3.31 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$

for vertical column with circular section.

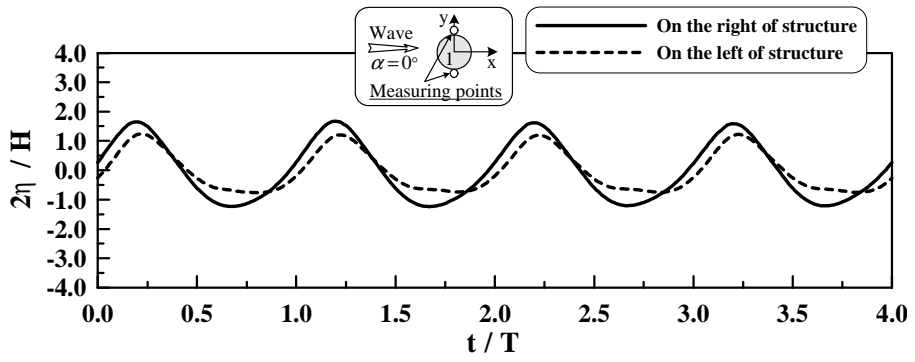
Fig. 3.33는 전술한 Fig. 3.30의 경우에 대하여 동일시간에 산정된 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 의 시간변화를 나타낸 결과이다. 구조물의 배치간격이 좁은  $e/D=0.25$ 의 경우가  $e/D=1.5$ 에 비해 보다 큰  $F_y$ 가 작용하는 것을 알 수 있으며,  $F_y$ 의 시간변화에는 비선형성이 나타난다. 따라서, 수면상승고의 차이로 나타나는 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 3.34는 Fig. 3.1의 원형단면을 가진 복수의 연직주상구조물에 대해서 구조물의 배치간격이  $e/D=1.0$ ,  $e/D=3.0$ 의 경우 구조물의 표면둘레에 따른 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 변화를 나타낸 결과이다. 여기서, 수심  $h=30\text{cm}$ 이며, Fig. 3.34(a)는 입사주기  $T=1.4\text{s}$ , Fig. 3.34(b)는 입사주기  $T=1.0\text{s}$ 의 경우이다.

Fig. 3.34(a)를 살펴보면 구조물의 배치간격  $e/D$ 의 변화에 따른 구조물 1에서의 무차원 최대수면상승고는 구조물의 배치간격이 상대적으로 좁은  $e/D=1.0$ 의 경우가  $e/D=3.0$ 의 경우에 비해  $\theta=180^\circ$ 를 기준으로 수면상승고의 변화에 비대칭성이 크게 나타나며, 수면상승고의 최대치는 구조물이 마주보는 내측면인  $\theta=290^\circ$ 의 부근에서 나타난다.



(a)  $e/D=0.25$



(b)  $e/D=1.5$

Fig. 3.32 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with circular section.

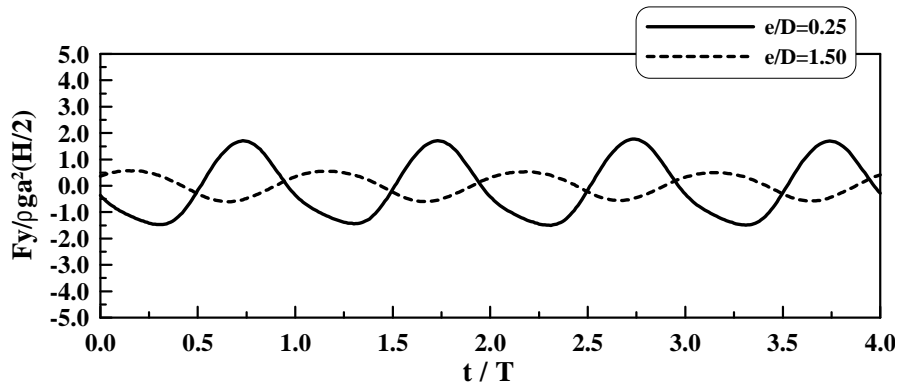
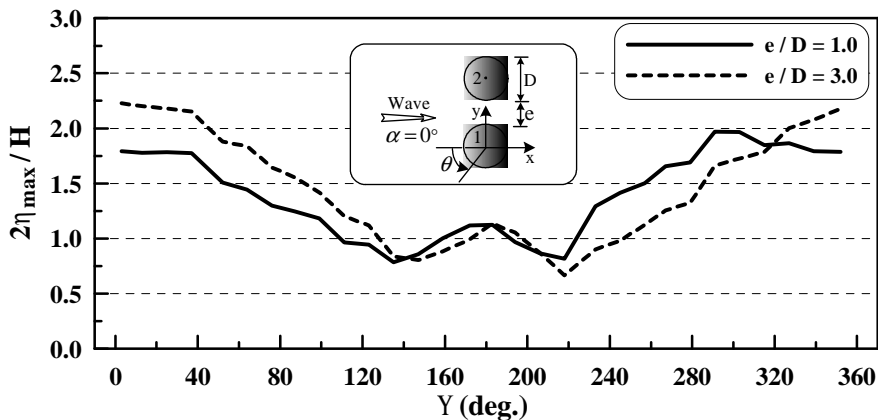
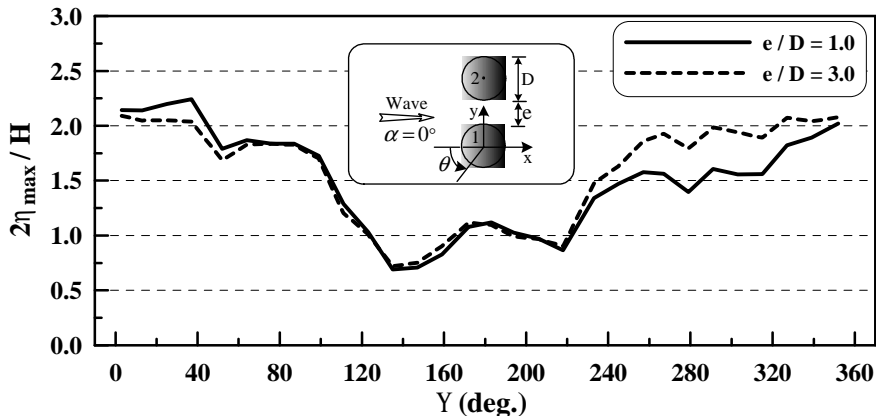


Fig. 3.33 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with circular section.

또한,  $\theta$ 의 변화에 따른 수면상승고의 변화양상은  $e/D=1.0$ ,  $e/D=3.0$ 인 경우에 모두 파가 입사하는  $\theta=0^\circ$ 에서 큰 수면상승고를 나타내고, 이후 파랑과 구조물간의 비선형간섭으로 감소와 증가를 반복하는 경향을 나타낸다. 특히,  $\theta \approx 180^\circ$ 의 부근에서 수면상승고는 회절산란파의 중첩으로 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 전체적으로  $\theta < 140^\circ$ 의 범위에서는 구조물의 배치간격이 상대적으로 넓은  $e/D=3.0$ 의 경우가  $e/D=1.0$ 의 경우에 비해 높은 수면상승고를,  $220^\circ < \theta < 320^\circ$ 의 범위에서는  $e/D=1.0$ 의 경우가  $e/D=3.0$ 의 경우에 비해 높은 수면상승고를 각각 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 구조물의 배치간격에 따라 구조물에 미치는 회절산란파의 영향이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.



(a)  $D/L=0.278$



(b)  $D/L=0.435$

Fig. 3.34 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$

around vertical column with circular section.

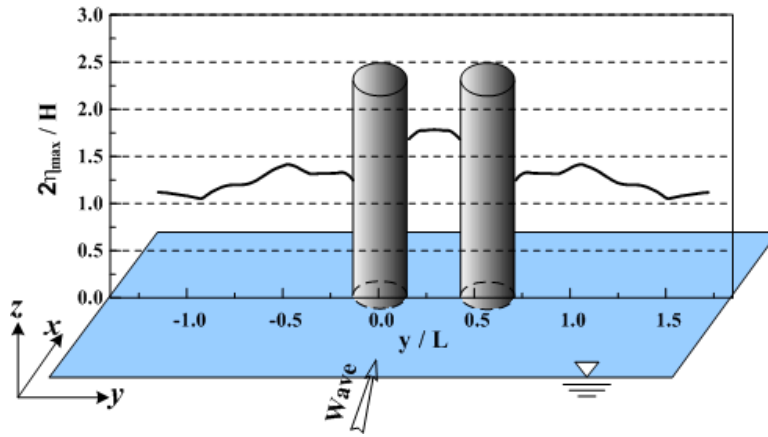
Fig. 3.34(b)는 Fig. 3.34(a)와 비교하여  $\theta$ 의 변화에 따른 무차원최대수면상승고의 변화가 유사한 경향을 나타내고 있지만, 구조물의 배치간격이 상대적으로 좁은  $e/D=1.0$ 의 경우에 수면상승고의 최대치는 파랑이 입사하는  $\theta \approx 40^\circ$ 부근에서 나타나며, 구조물이 마주 보는 내측면인  $220^\circ < \theta < 340^\circ$ 에서 관찰되는 수면상승고는  $0^\circ < \theta < 120^\circ$ 에서의 수면상승고보다 더 작은 값으로 주어지는 것을 알 수 있다. 그리고, 구조물의 배치간격이  $e/D=1.0$ 인 경우에 대하여 수면상승고의 변화값을 Fig. 3.34(a)와 비교하면 Fig. 3.34(a)의 경우는  $220^\circ < \theta < 300^\circ$ 에서, Fig. 3.34(b)의 경우는  $0^\circ < \theta < 120^\circ$ 에서 수면상승고의 변화가 크게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 주기가 짧은 경우에 구조물에 의해 대부분의 파랑에너지가 회절반사되며, 주기가 긴 경우에 대해서는 구조물간의 배후로 통한 파랑에너지의 전달이 크게 된 결과로 판단된다.

전체적으로 구조물의 배치간격  $e/D$ 의 변화에 따른 구조물의 표면둘레에서 무차원최대수면상승고는  $\theta$ 의 변화에 따라 구조물에 의한 회절산란파의 영향과 구조물간의 비선형간섭으로 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있다.

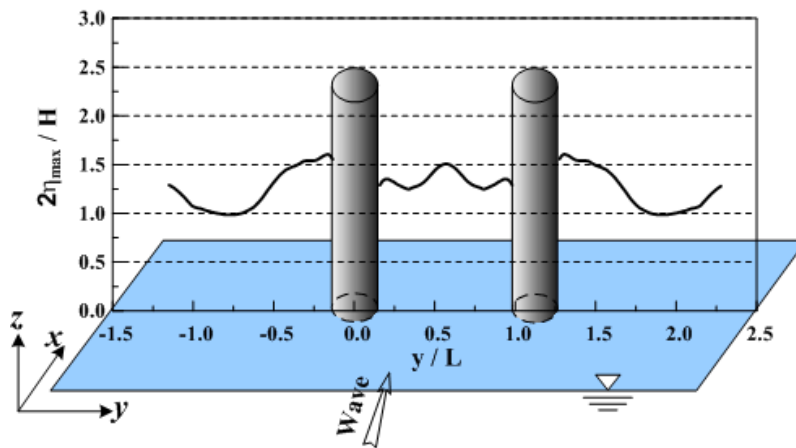
Fig. 3.35과 Fig. 3.36은 Fig. 3.34의 경우에 대하여 구조물의 중심위치에서 축을 따른 무차원최대수면변동을 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 구조물의 내측면에서 수면변동은 구조물간의 비선형간섭으로 부분중복파를 형성하며, 그 특성은 구조물의 배치간격  $e/D$  및 주기의 변화에 따라 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, 구조물의 외측에서 수면변동은 구조물에 의해 발생하는 회절산란파의 영향을 크게 받으며, 이러한 경향은 주기가 짧은 Fig. 3.36의 경우에 보다 명확히 나타난다.

또한, 주기가 짧은 경우에 구조물에 의한 비선형간섭 및 회절산란파의 영향으로 구조물의 외측에서 수면변동은 큰 변동값을 나타내는 것을 알 수 있다.



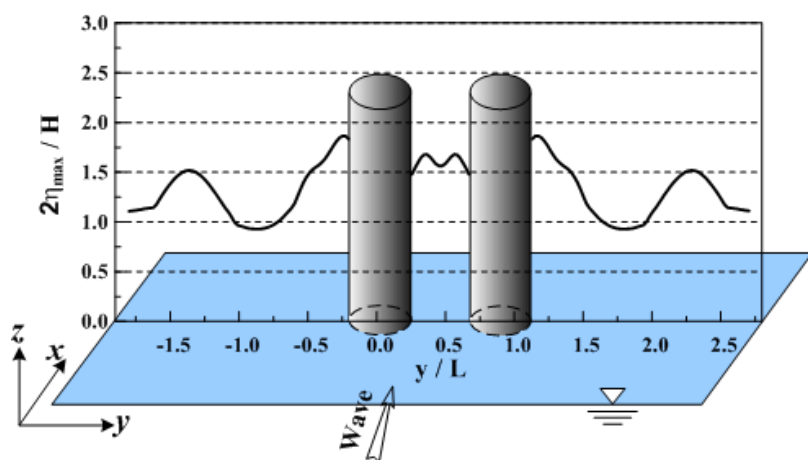


(a)  $e/D=1.0$



(b)  $e/D=3.0$

Fig. 3.35 Distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$  along y-axis( $D/L=0.278$ ).



(a)  $e/D=1.0$

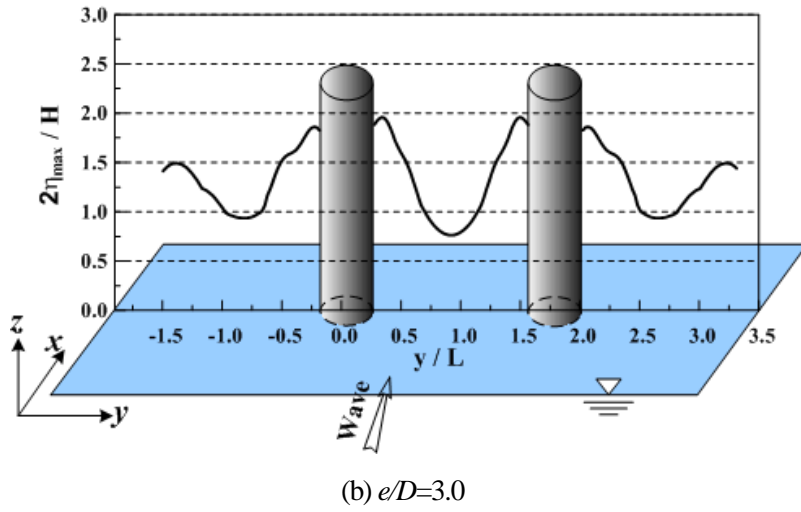
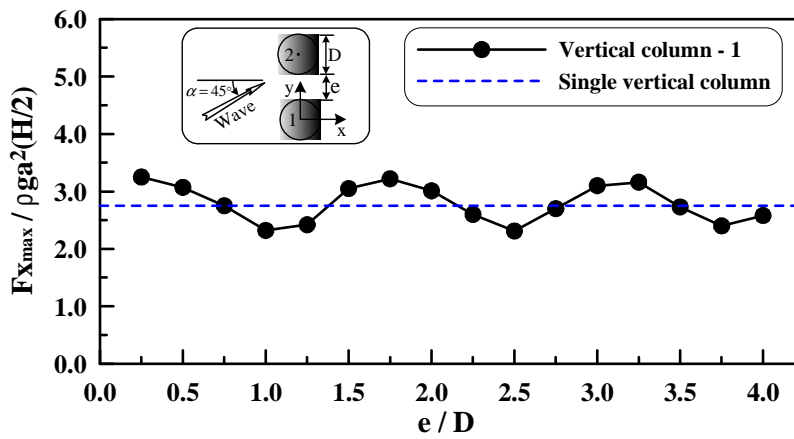


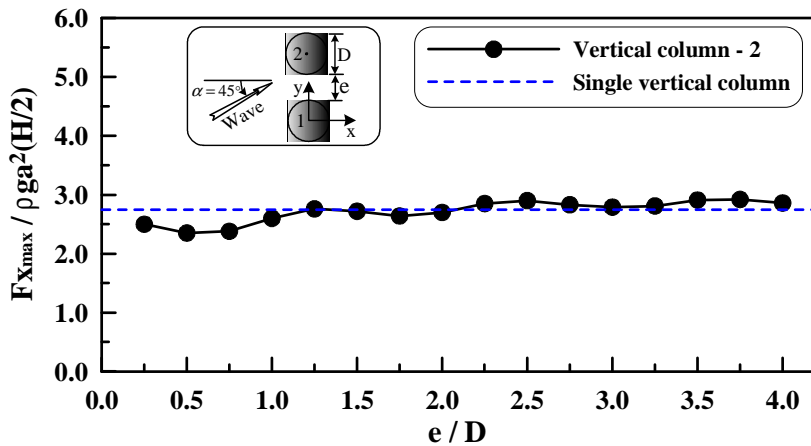
Fig. 3.36 Distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$  along y-axis( $D/L=0.435$ ).

#### 4.2.2 입사파향각 $\alpha = 45^\circ$

Fig. 3.37은 입사파향각  $\alpha = 45^\circ$ 인 경우에 구조물의 배치간격에 따른 연직주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 의 최대값 변화를 살펴본 결과이다. Fig. 3.37(a)는 파진행 방향 우측에 설치된 구조물 1의 경우이며, Fig. 3.37(b)는 파진행방향 좌측에 설치된 구조물 2에 대한 경우이다. 그림을 살펴보면 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화는 구조물 1의 경우가 구조물 2의 경우에 비해 크게 변동하는 것을 알 수 있다.



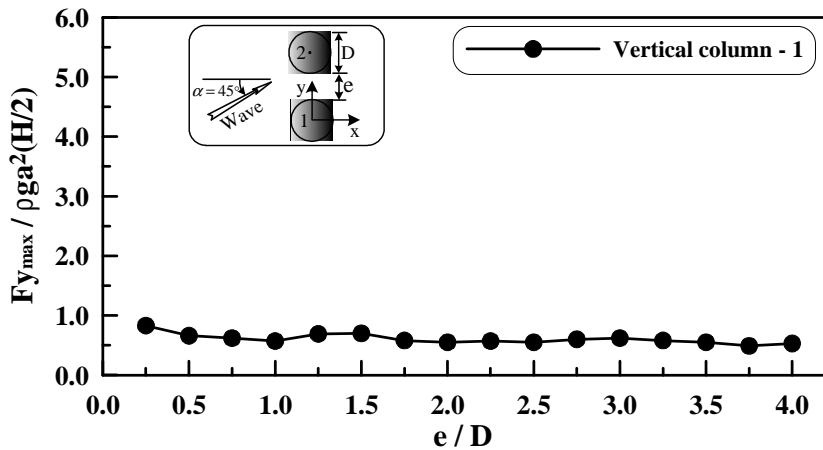
(a) Vertical column 1



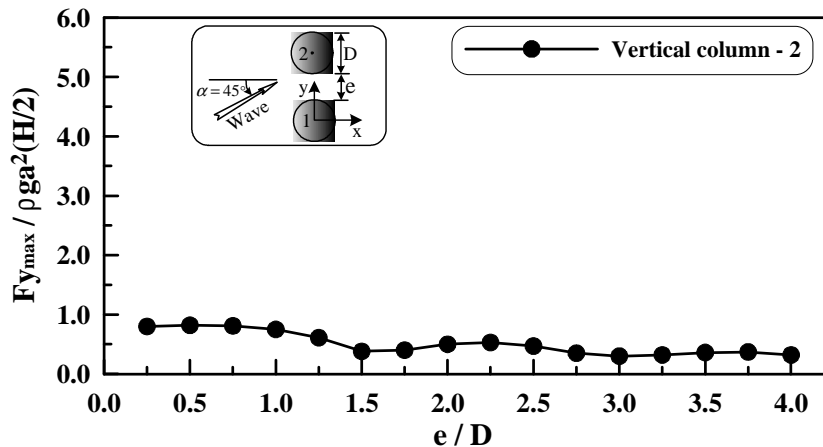
(b) Vertical column 2

Fig. 3.37 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column with circular section.

그리고,  $F_x$ 의 변화는 구조물의 배치간격이 일정거리 이상이 되는 곳에서는 단수연직 주상구조물에 대한  $F_x$ 에 근접하는 것을 알 수 있고, 이러한 경향은 구조물 1의 경우에 비해 구조물 2에서 보다 명확히 나타난다. 구조물의 배치간격에 따른 구조물 1에서의  $F_x$ 에 대한 최대값은 구조물의 배치간격  $e/D$ 가 1.75의 정수배되는 지점의 부근으로, 구조물간의 거리를 파진행방향으로 투영한 거리가 입사파장  $L$ 의 약 1/2배가 되는 거리에 상당된다.



(a) Vertical column 1



(b) Vertical column 2

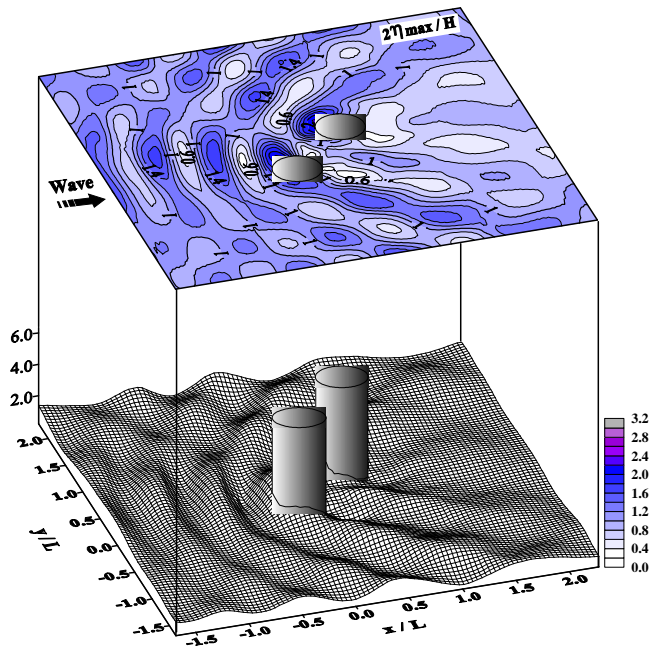
Fig. 3.38 Variation of y-directional maximum wave forces acting on vertical column with circular section.

Fig. 3.38은 입사파향각  $\alpha=45^\circ$ 인 경우에 구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 의 변화를 구조물의 배치간격  $e/D$ 를 파라미터로 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면  $F_y$ 는  $F_x$ 에 비해 보다 작은 파력을 나타내고 있고,  $F_y$ 의 변화에 미치는 구조물 배치간격의 영향은 크게 없는 것을 알 수 있다.

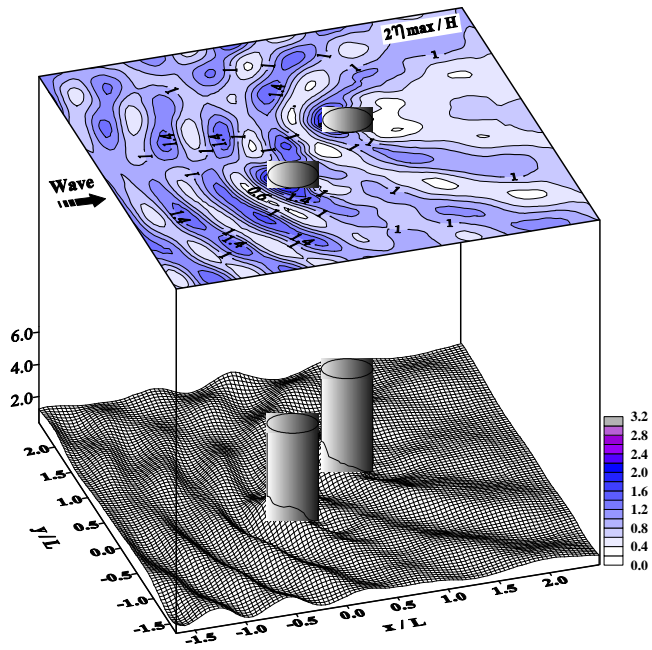
Fig. 3.39는 Fig. 3.37(a)의 경우에 대해  $F_x$ 가 작게 나타나는 지점( $e/D=1.0$ )과 크게 나타나는 지점( $e/D=1.75$ )에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면 구조물 1의 전면에서 형성되는 부분중복파는 구조물의 배치간격에 따라 형성위치가 상이한 반면, 구조물 2의 전면에서 형성되는 부분중복파의 형성위치는 구조물의 배치간격에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그리고, 구조물 1의 전면의 파동장에 형성되는 부분중복파는 Fig. 3.39(a)에 비해 Fig. 3.39(b)의 경우에서 보다 큰 범위로 명확히 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.40은 파진행방향의 우측에 설치된 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 그림이다. 전체적으로 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 크기는 구조물의 배치간격이 넓은 Fig. 3.40(b)에서 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 구조물의 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 살펴보면 구조물의 배치간격이 좁은 Fig. 3.40(a)의 경우가 Fig. 3.40(b)의 경우에 비해 수면상승고의 시간변화에 큰 비선형성이 관찰되며, 이와 같은 결과는 구조물의 배치간격이 좁은 경우 구조물 1에 미치는 구조물 2의 간섭현상이 크게 된 결과로 판단된다.

Fig. 3.41은 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 Fig. 3.40에 대하여 동일시간에 산정된 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 의 시간변화를 나타낸 그림이다. 구조물의 배치간격이 큰  $e/D=1.75$ 의 경우가  $e/D=1.0$ 에 비해 보다 큰  $F_x$ 가 작용하는 것을 알 수 있으며, 이러한 원인은 전술한 구조물의 배치간격에 따른 구조물의 주위에서 수면상승고의 차이로 판단된다. 결과적으로 입사파가 경사지게 입사하는 경우에는 구조물의 배치간격에 따라 상이하게 나타나는 부분중복파와 구조물간의 간섭현상에 의해 구조물에 작용하는 파력은 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

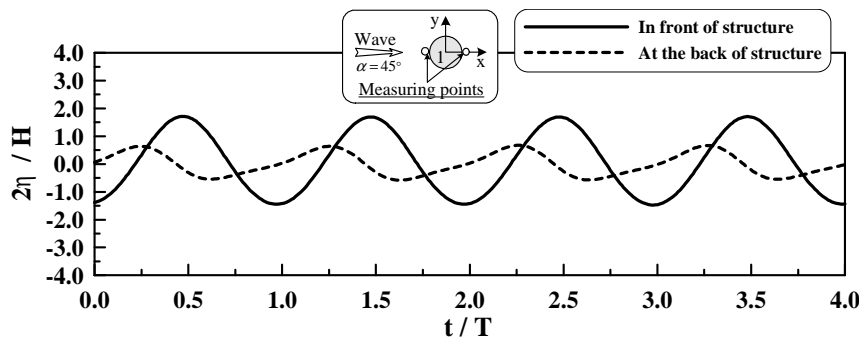


(a)  $e/D=1.0$

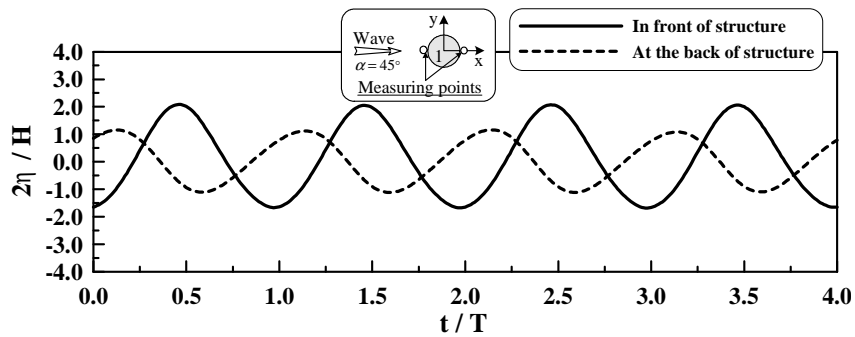


(b)  $e/D=1.75$

Fig. 3.39 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$  for vertical column with circular section.



(a)  $e/D=1.0$



(b)  $e/D=1.75$

Fig. 3.40 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with circular section.

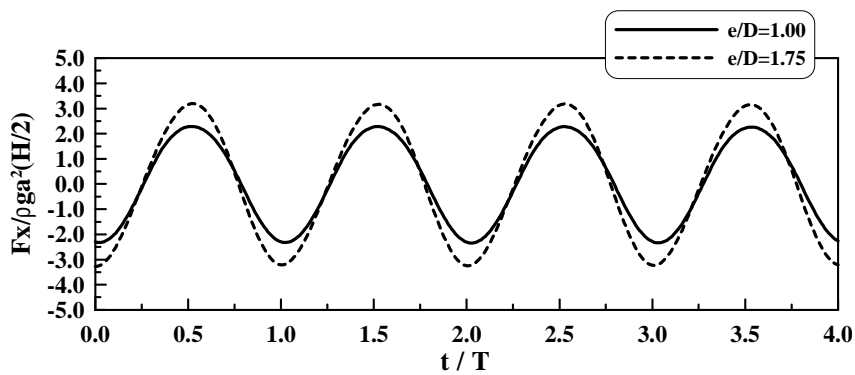


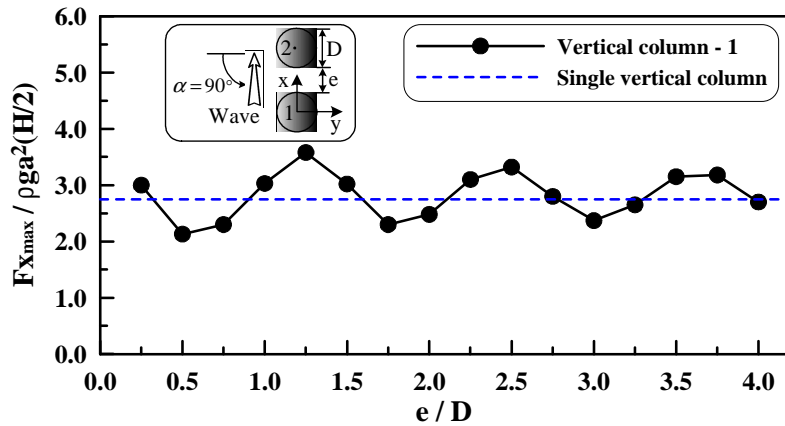
Fig. 3.41 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column



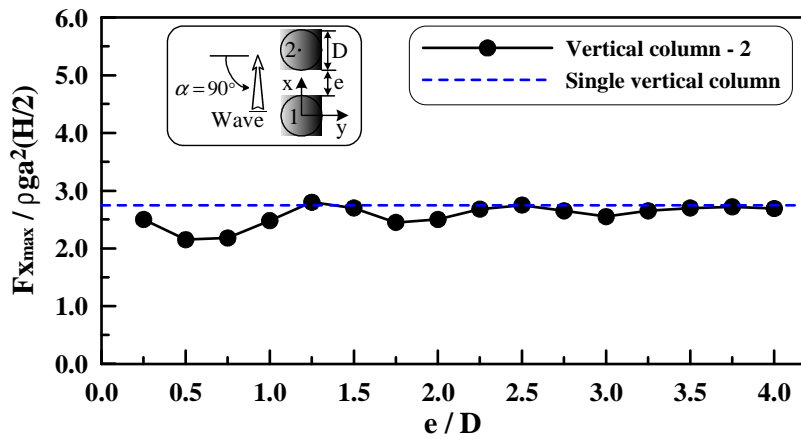
with circular section.

### 4.2.3 입사파향각 $\alpha = 90^\circ$

Fig. 3.42는 원형단면을 갖는 연직주상구조물에 대하여 입사파가  $90^\circ$ 로 입사하는 경우에 구조물의 배치간격에 따른 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3.42(a)는 파진행방향의 전면에 설치된 구조물 1의 경우이며, Fig. 3.42(b)는 파진행방향의 후면에 설치된 구조물 2의 경우이다. 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화를 살펴보면 구조물 1의 경우 단수연직주상구조물의  $F_x$ 를 중심으로 크게 변동하며, 구조물 2의 경우에 대해서는 대부분이 단수연직주상구조물의  $F_x$  이하의 범위에서 변동하는 것을 알 수 있다.



(a) Vertical column 1



(b) Vertical column 2

Fig. 3.42 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column

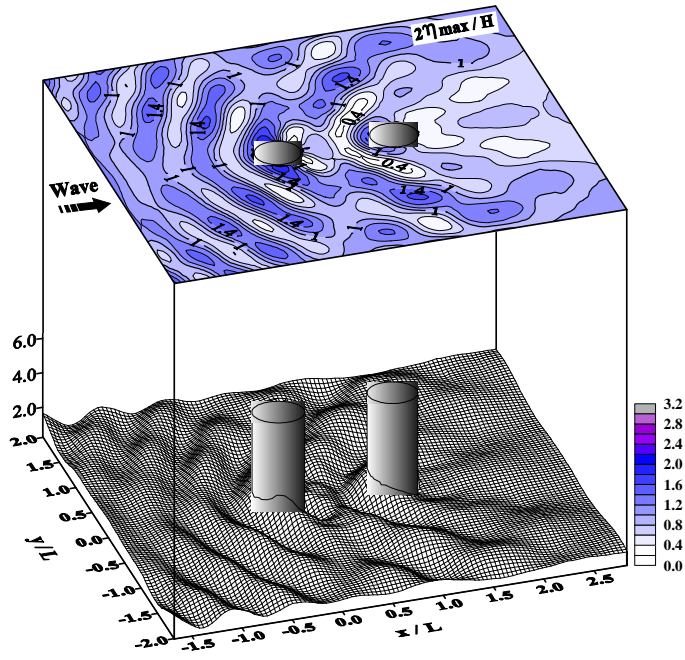
with circular section.

특히, 구조물 2의 경우에 대해  $F_x$ 가 단수연직주상구조물의  $F_x$  이하의 값에서 주어지는 것은 구조물 1에 의한 회절산란파의 영향이 구조물 2에 미친 결과로 판단된다. 그리고, 구조물 1의 경우, 파력의 최대치가 나타나는 구조물의 배치간격은 구조물의 배치간격이 1.25의 정수배 되는 지점의 부근으로, 구조물간의 거리가 입사파장  $L$ 의 약 1/2배가 되는 거리에 해당하는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 전술한 바와 같이 구조물에 의한 회절파의 영향과 구조물간의 간섭현상으로 구조물간의 내부파동장에 형성되는 부분중복파의 영향이 공진현상으로 발생한 결과로 판단된다.

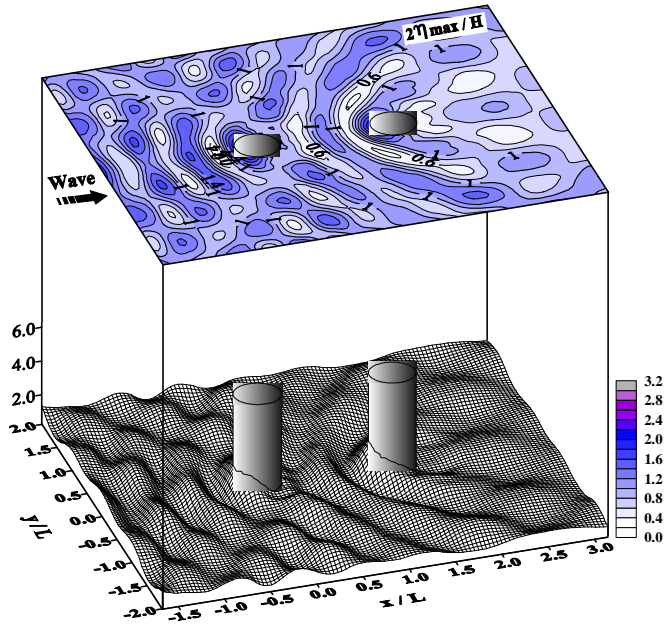
Fig. 3.43은 파진행방향 전면에 설치된 구조물 1을 대상으로  $F_x$ 가 작게 나타나는 지점( $e/D=1.75$ )과 크게 나타나는 지점( $e/D=2.5$ )에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 나타낸 그림이다. 그림으로부터 구조물의 배치간격에 따라 구조물 주변의 부분중복파는 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 3.43(b)의 경우 부분중복파는 구조물 1의 전면에 집중되어 형성되는 반면, Fig. 3.43(a)의 경우는 부분중복파가 구조물 1의 양측면에 분산되어 형성되고, 구조물 2와의 간섭으로 구조물의 배후면에서는 수면상승고가 복잡하게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.44는 Fig. 3.43의 경우에 대해 구조물간의 간섭현상을 보다 상세히 살펴보기 위하여 구조물 1의 전면과 배후면에 설치된 수위계로부터 얻어진 수면상승고의 시간변화를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 구조물의 전면에서는 부분중복파가 형성되는 것을 알 수 있고, 구조물의 배치간격이 넓은  $e/D=2.5$ 의 경우에 구조물의 전면과 후면에서 위상차이가 크게 발생한다.

Fig. 3.45은 구조물의 배치간격이  $e/D=1.75$ ,  $e/D=2.5$ 인 경우에 Fig. 3.44의 경우와 동일시간에 구조물 1에 작용하는  $F_x$ 의 시간변화를 나타낸 결과이며, 구조물의 배치간격에 따라 작용파력은 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 구조물의 배치간격에 따른 구조물의 주위에서 수면상승고의 차이로 인해 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 가 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.

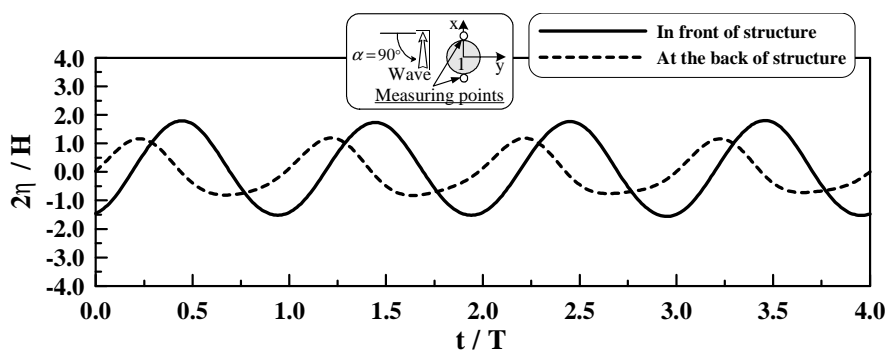


(a)  $e/D=1.75$

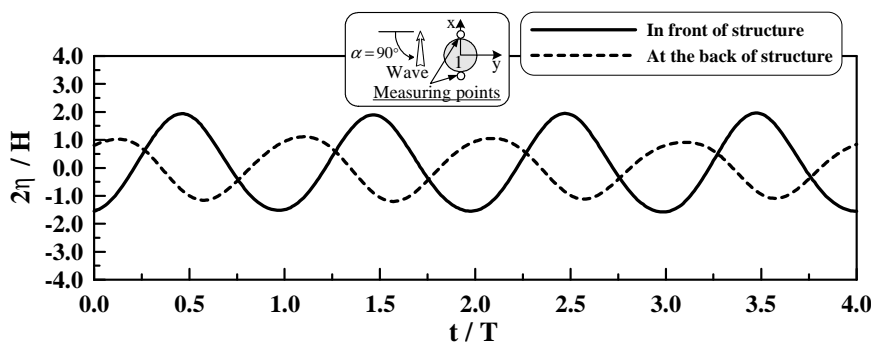


(b)  $e/D=2.50$

Fig. 3.43 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$  for vertical column with circular section.



(a)  $e/D=1.75$



(b)  $e/D=2.5$

Fig. 3.44 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with circular section.

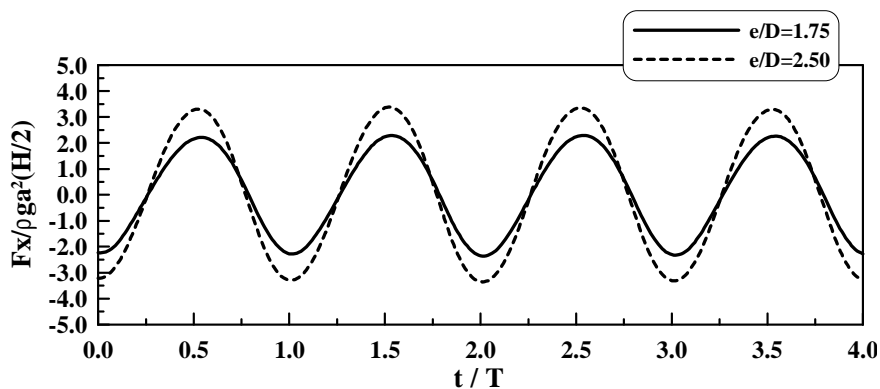


Fig. 3.45 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column

with circular section.

### 4.3 정사각형단면의 복수연직주상구조물

본 절에서는 정사각형의 단면형상을 갖는 Fig. 3.46의 복수연직주상구조물을 대상으로 구조물의 배치간격  $e/B$  및 입사파향각  $\alpha$ 의 변화에 따른 구조물에 작용하는 비선형파력 및 구조물에 의한 주변파동장의 변화특성을 검토한다. 이 때, 수치해석에 적용한 입사파 조건 및 연직주상구조물의 제원을 다음의 Table 3.4에 제시한다.

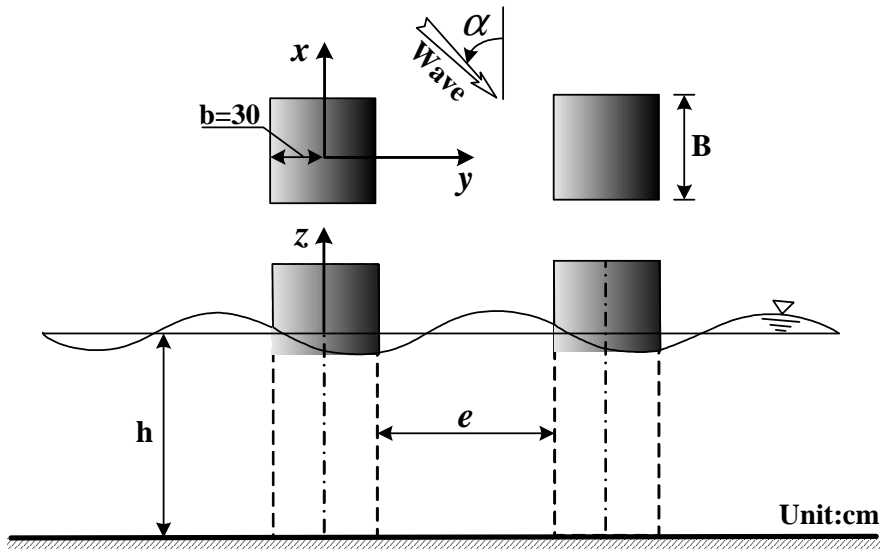


Fig. 3.46 Numerical model of dual vertical columns with square section.

Table 3.4 Conditions of numerical analysis for square column.

Shape of structure	$T(s)$	$H(cm)$	$h(cm)$	$D(cm)$	$H/L$	$e/B$	$\alpha(^{\circ})$
Square column	1.0	6	35	60	0.04	0.25~4.0	0
							45
							90

#### 4.3.1 입사파향각 $\alpha = 0^\circ$

입사파향각  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우에 파진행방향의 우측에 설치된 구조물 1을 대상으로 구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$  및  $y$ 방향성분  $F_y$ 의 최대값의 변화를 구조물의 배치간격  $e/B$ 를 파라미터로 Fig. 3.47(a)와 Fig. 3.47(b)에 나타내었다.

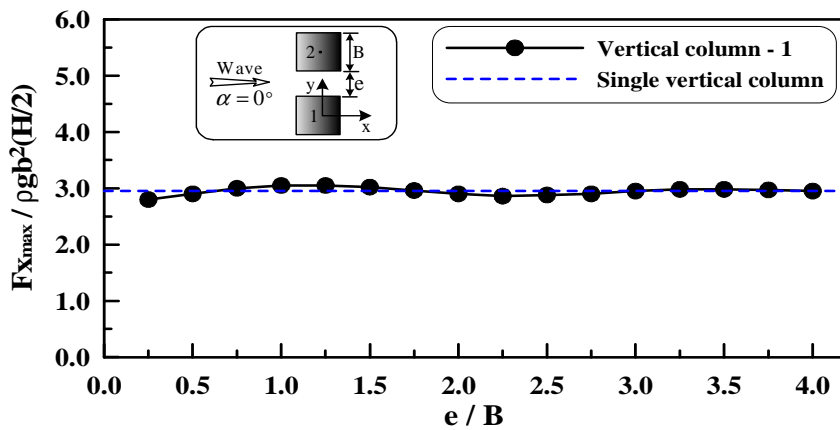
먼저,  $x$ 축방향의 무차원최대파력을 살펴보면 전술한 4.2절의 원형단면의 경우와 동일하게 전체적으로  $F_x$ 의 변화에 미치는 구조물의 배치간격의 영향은 크게 없는 것으로 판단된다. 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 의 변화는 단수연직주상구조물의 경우에 대한  $F_x$  값을 중심으로 변동하고 있으며, 구조물의 배치간격이 일정거리 이상이 되는 곳에서는 단수연직주상구조물의  $F_x$ 와 거의 동일한 값을 나타내고 있다.

$y$ 축방향의 무차원최대파력을 살펴보면 구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 는  $F_x$ 와 비교하여 구조물의 배치간격에 상대적으로 큰 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 전술한 원형단면을 갖는 연직주상구조물보다 명확히 나타나고 있다. 그리고,  $F_y$ 의 최대값은 구조물의 배치간격이 가장 좁은  $e/B=0.25$ 에서 나타나고, 이후 감소하다가 구조물 사이의 거리  $e$ 가 입사파장  $L$ 에 대해 약  $e \approx 1.0L$ 이 되는  $e/B=2.5$ 부근에서  $F_y$ 의 값이 다시 증가하는 것을 알 수 있고, 구조물의 배치간격이 더욱 멀어지면 단수연직주상구조물의 거동을 나타낼 것으로 판단된다.

Fig. 3.48는 구조물의 배치간격이  $e/B=0.25$ ,  $e/B=1.0$ ,  $e/B=2.0$ ,  $e/B=2.5$ 인 경우에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 나타낸 결과이다. 전체적으로 구조물의 배치간격에 따른 구조물의 주위에서 부분중복파는 상이하게 나타나며, 구조물의 전면이 구조물의 배후면에 비해 보다 높은 수면상승고를 나타내고 있다. 그리고, 구조물의 배치간격이 가장 좁은 Fig. 3.48(a)의 경우에 구조물의 내측에서 가장 복잡한 수면상승고가 나타나고, Fig. 3.48(d)의 경우는 내측의 전단면에 걸쳐 높은 수면상승고가 형성되며, 구조물의 내·외측에서 수면상승고의 차이도 크게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 연직주상구조물에 작용하는 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격에 따른 파랑에

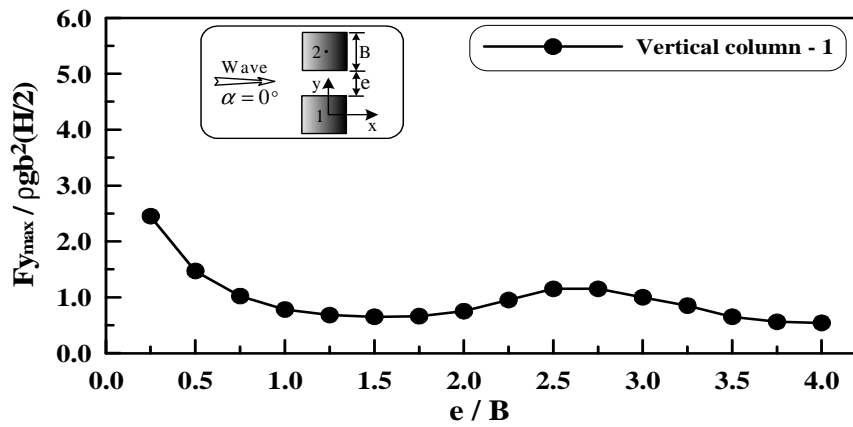
너지 전달과 구조물에 의한 회절산란파의 영향으로 형성되는 내부파동장의 변화에 큰 영향을 받는 것으로 판단되며, 이러한 경향은 원형단면을 갖는 연직주상구조물의 경우와 동일함을 알 수 있다.

Fig. 3.49는  $e/B=1.0$ ,  $e/B=2.0$ 에 대하여 파진행방향의 우측에 설치된 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 무차원수면상승고의 시간변화를 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 구조물의 전면에서는 부분중복파에 의한 높은 수면상승고가 확인되며, 구조물의 배후면에서는 구조물의 배치간격에 따른 파랑에너지의 전달과 구조물에 의한 회절파의 영향으로 수면상승고의 시간변화에 비선형성이 관찰된다. 그리고, 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고는 위상차이가 발생하며, 구조물 1의 전면과 배후면에서의 수면상승고에 대한 차이는 구조물의 배치간격  $e/B$ 에 따라 현저하지 않은 것을 알 수 있다. 따라서, 구조물의 주위에서 수면상승고의 차이로 나타나는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 는 구조물의 배치간격에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.



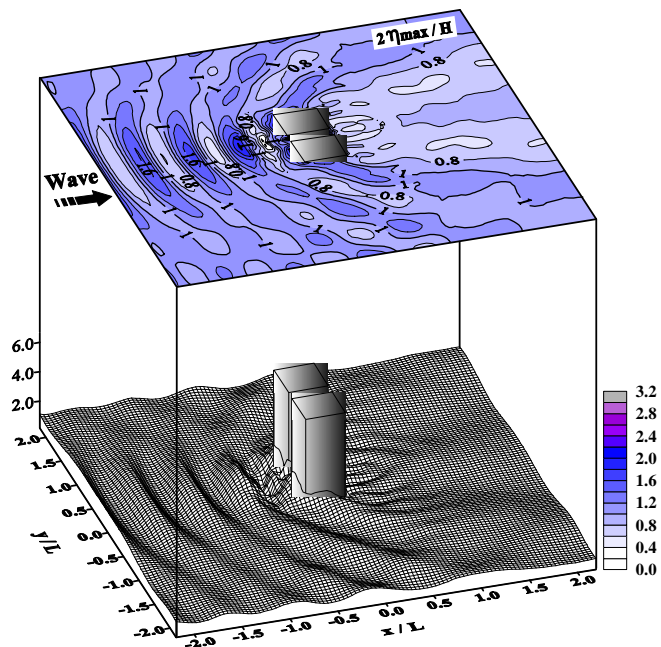
(a)  $x$ -directional wave force components



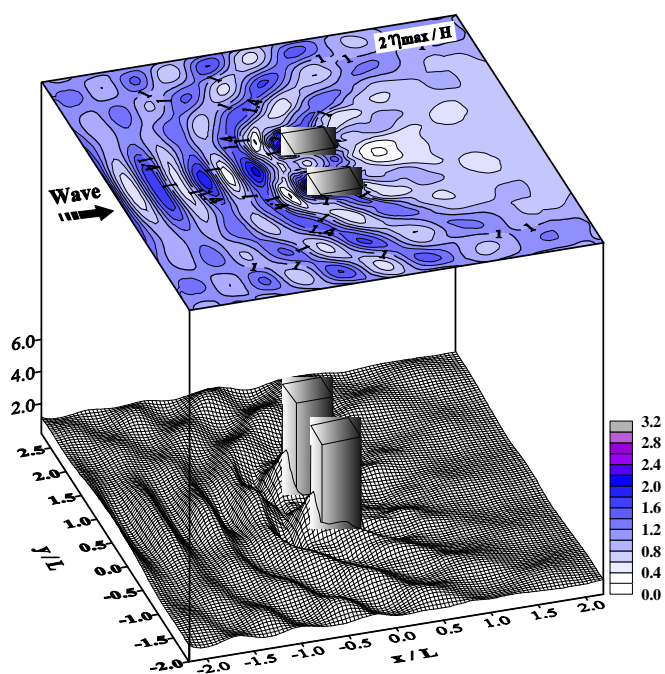


(b) y-directional wave force components

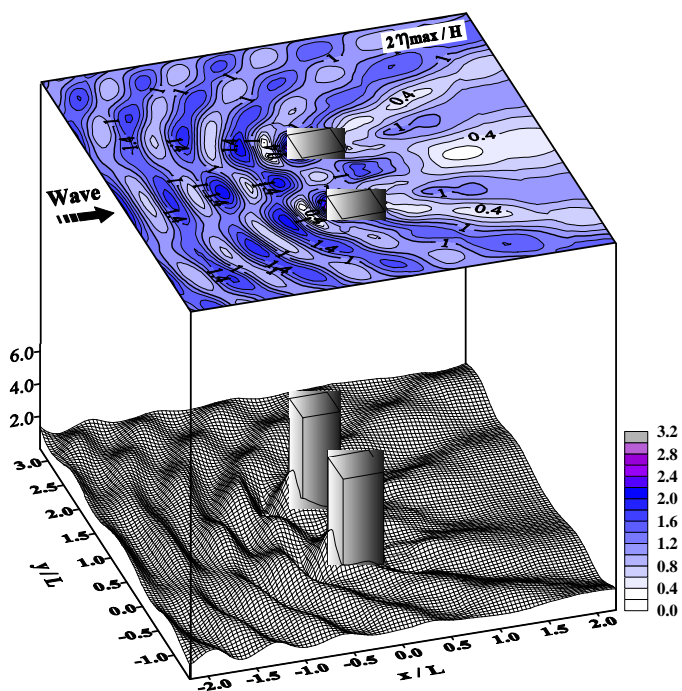
Fig. 3.47 Variation of maximum wave force components acting on vertical column 1 with square section.



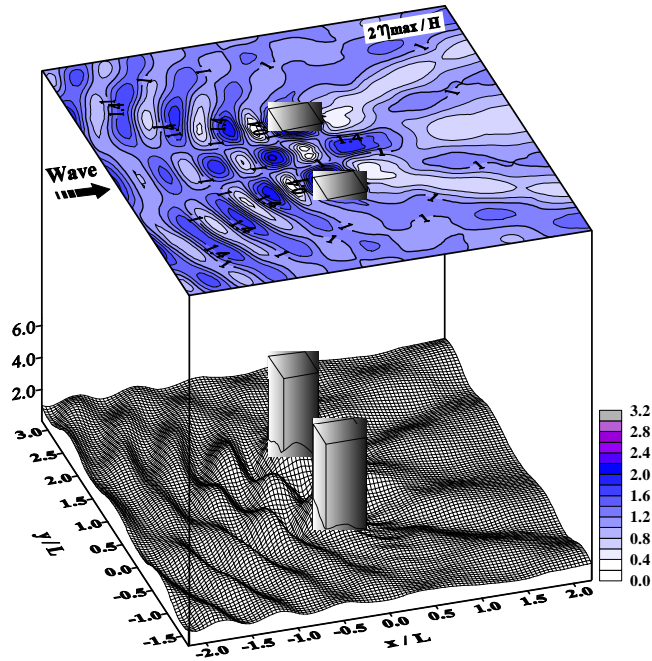
(a)  $e/B=0.25$



(b)  $e/B=1.0$



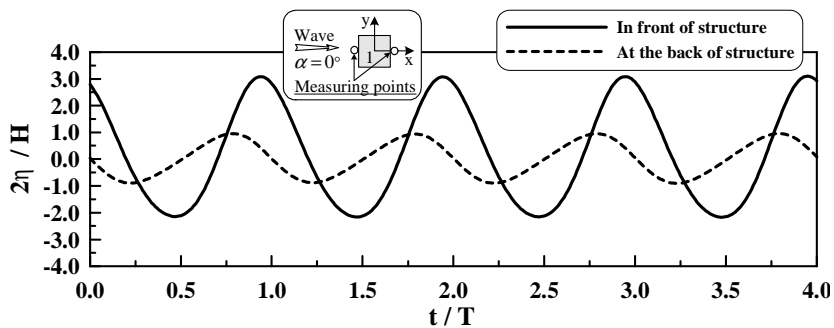
(c)  $e/B=2.0$



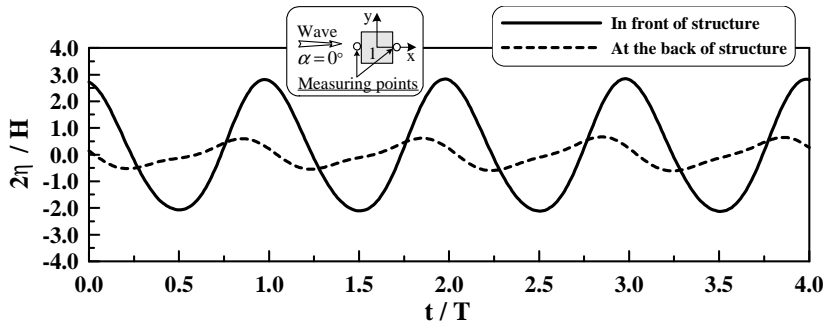
(d)  $e/B=2.5$

Fig. 3.48 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$   
for vertical column with square section.

Fig. 3.50은 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 Fig. 3.49에 대하여 동일시간에 산정된  $F_x$ 의 시간변화를 나타낸 결과이다. 전술한 바와 같이 입사파향각  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우  $F_x$ 의 시간변화에 미치는 구조물의 배치간격의 영향은 없으며, 이러한 원인은 구조물의 배치간격에 따른 구조물의 전면과 배후면에서 수면상승고의 차이가 거의 동일하기 때문인 것으로 판단된다.



(a)  $e/B=1.0$



(b)  $e/B=2.0$

Fig. 3.49 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with square section.

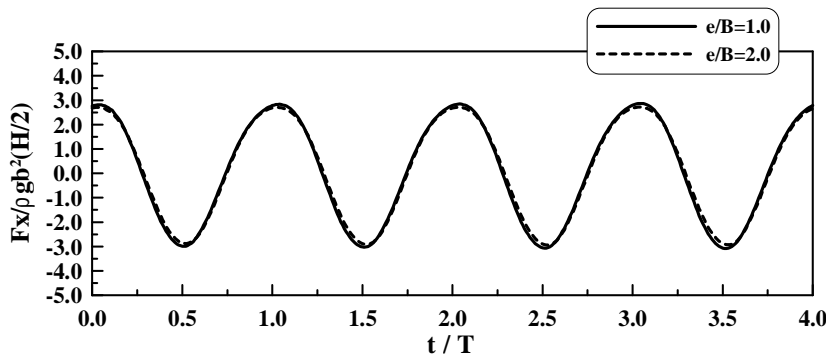


Fig. 3.50 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with square section.

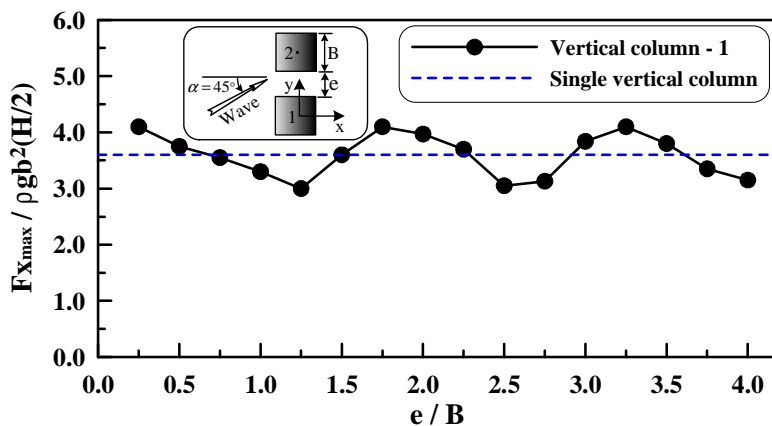
#### 4.3.2 입사파향각 $\alpha = 45^\circ$

Fig. 3.51과 Fig. 3.52는 입사파향각  $\alpha = 45^\circ$ 의 경우에 구조물의 배치간격에 따른 정사각형 단면을 갖는 연직주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 와  $y$ 방향성분  $F_y$ 에 대한 최대값의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 3.51(a)와 Fig. 3.52(a)는 파진행방향의 우측에 설치된 구조물 1의 경우이며, Fig. 3.51(b)와 Fig. 3.52(b)는 파진행방향의 좌측에 설치된 구조물 2에 대한 경우이다.

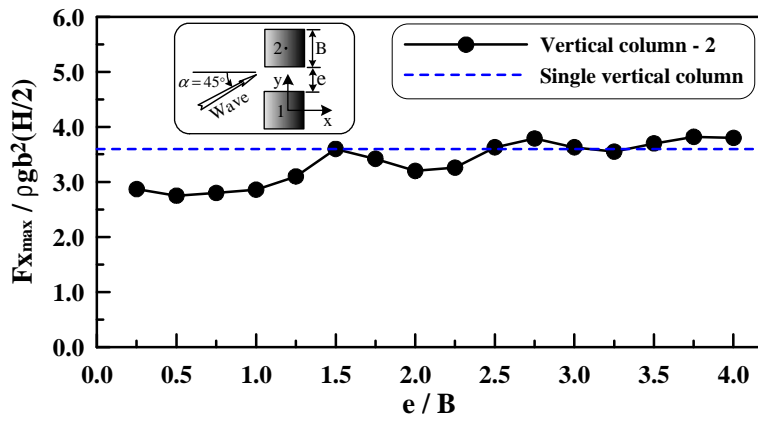
파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 를 살펴보면 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 는 구조물 1의 경우가 구조물 2의 경우에 비해 크게 변동하는 것을 알 수 있다. 그리고,  $F_x$ 의 변화는 구조물의 배치간격이 멀어질수록 단수연직주상구조물에 대한  $F_x$ 에 근접하는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 구조물 1의 경우에 비해 구조물 2에서 보다 명확히 나타나고 있다. 구조물의 배치간격에 따른 구조물 1에서의  $F_x$ 에 대한 최대값은 원형의 경우와 동일하게 구조물의 배치간격  $e/B$ 가 1.75의 정수배 되는 지점의 부근에서 나타나며, 이는 구조물 간의 거리를 파진행방향으로 투영한 거리가 입사파장  $L$ 의 약  $1/2$ 배가 되는 거리에 상당된다.

전술한 원형단면과 비교하였을 때 전체적으로 단면형상에 따른 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 의 변화는 구조물 1의 경우 원형단면에 비해 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물이, 구조물 2의 경우에 대해서는 정사각형단면에 비해 원형단면을 갖는 연직주상구조물에서 큰 파력이 관찰된다. 이와 같은 원인은 구조물 1의 단면형상에 따라 구조물 2에 미치는 회절산란파의 영향이 상이하게 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 3.52의 구조물 배치간격  $e/B$ 에 따른 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 의 변화를 살펴보면  $F_y$ 는  $F_x$ 에 비해 보다 작은 파력을 나타내고 있으며, 구조물의 배치간격에 따른  $F_y$ 의 변화에 미치는 영향은 크게 없는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 원형단면을 갖는 연직주상구조물의 경우에서도 동일하게 나타났다.



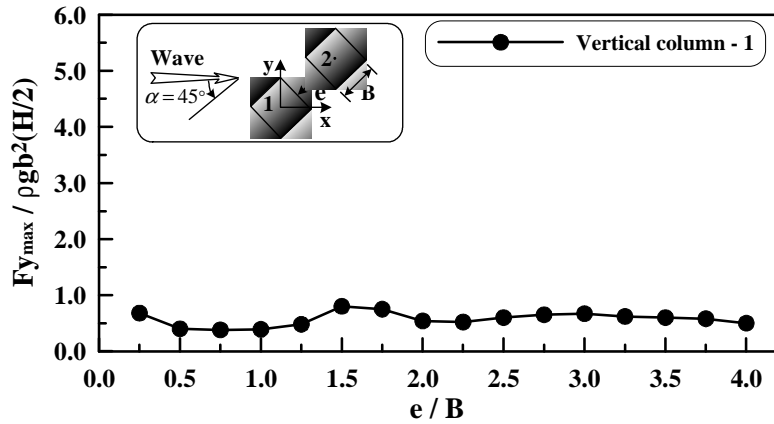
(a) Vertical column 1



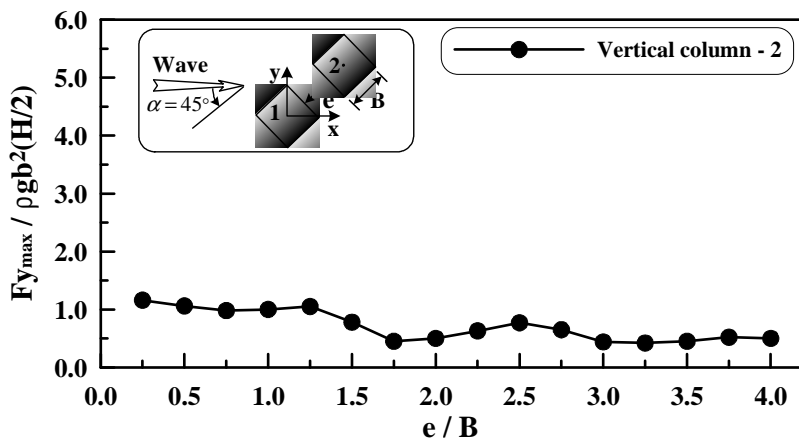
(b) Vertical column 2

Fig. 3.51 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column with square section.

Fig. 3.51의 파진행방향에 대해 우측에 설치된 구조물 1에서  $F_x$ 가 작게 나타나는 구조물의 배치간격( $e/B=1.25$ )과 크게 나타나는 배치간격( $e/B=1.75$ )에 대한 무차원최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 Fig. 3.53에 나타내었다.



(a) Vertical column 1



(b) Vertical column 2

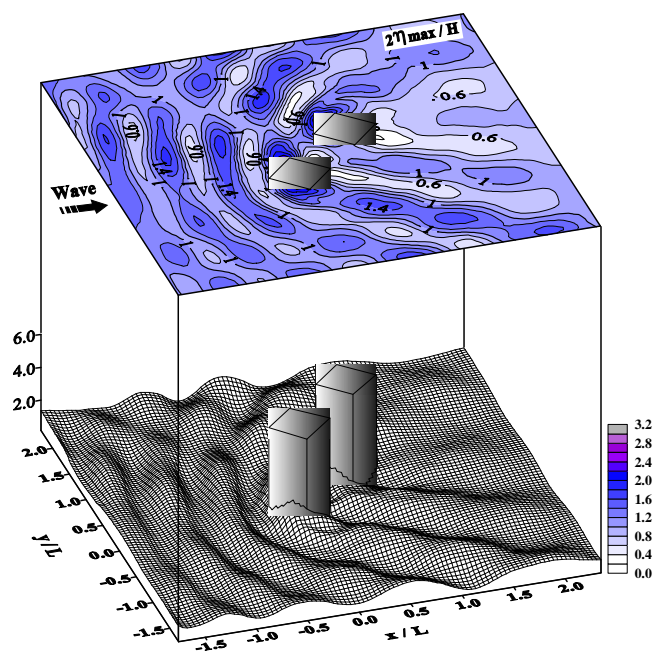
Fig. 3.52 Variation of y-directional maximum wave forces acting on vertical column with square section.

그림을 살펴보면, 구조물 1의 전면파동장에 형성되는 부분중복파는 Fig. 3.53(a)에 비해 Fig. 3.53(b)의 경우에서 보다 큰 범위로 명확히 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, 구조물 2의 전면에 형성되는 부분중복파의 형성위치는 구조물의 배치간격에 큰 영향을 받지 않는 반면, 구조물 1의 전면에 형성되는 부분중복파는 구조물의 배치간격에 따라 형성위치가 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 구조물 1의 전면에 형성되는 부분중복파는 구조물의 배치간격에 따라 구조물 2에 의한 회절반사파의 영향을 크게 받고, 반면에 구조물 1에 의한 회절반사파가 구조물 2에 미치는 영향은 작기 때문인 것으로 판단된다.

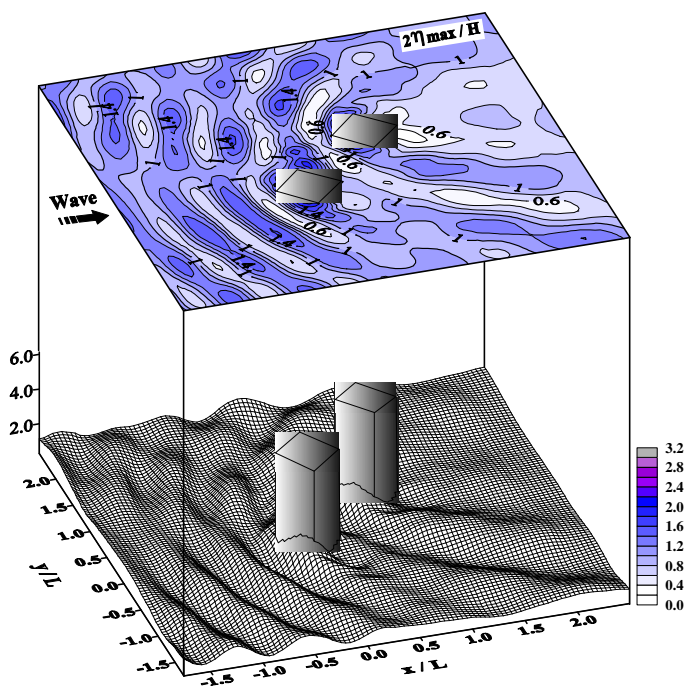
Fig. 3.54는 파진행방향의 우측에 설치된 구조물 1에서  $F_x$ 가 작게 나타나는 구조물의 배치간격( $e/B=1.25$ )과 크게 나타나는 배치간격( $e/B=1.75$ )에 대한 구조물 1의 전면과 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화를 나타낸 그림으로, 구조물의 배치간격이 넓은 Fig. 3.54(b)의 경우가 구조물 1의 전면과 후면에서 수면상승고의 차이가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 구조물의 배치간격이 좁은 Fig. 3.54(a)의 경우가 Fig. 3.54(b)의 경우에 비해 구조물의 배후면에서 측정되는 수면상승고의 시간변화에 큰 비선형성이 관찰되며, 이와 같은 결과는 구조물의 배치간격이 좁은 경우에 구조물 1에 미치는 구조물 2의 간섭현상이 크게 된 결과로 판단된다.

Fig. 3.55과 Fig. 3.56는 전술한 구조물의 배치간격  $e/B=1.25$ 와  $e/B=1.75$ 의 경우 구조물 1에서 동일시간에 산정된  $F_x$  및  $F_y$ 의 시간변화를 나타낸 결과이다.  $F_x$ 가  $F_y$ 에 비해 큰 값으로 주어지는 것을 알 수 있고, 배치간격이 큰  $e/B=1.75$ 에서  $F_x$ 와  $F_y$ 가 보다 큰 파력을 나타내고 있다. 그리고,  $F_y$ 의 시간변화에는 큰 비선형성이 나타나며, 이러한 결과는 입사파가 경사지게 입사하는 경우에 구조물의 배치간격에 따라 상이하게 나타나는 부분중복파와 구조물간의 간섭현상으로 나타난 결과로 판단된다.



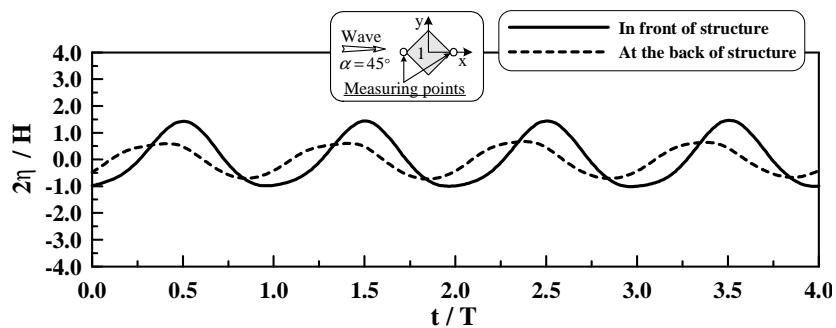


(a)  $e/B=1.25$

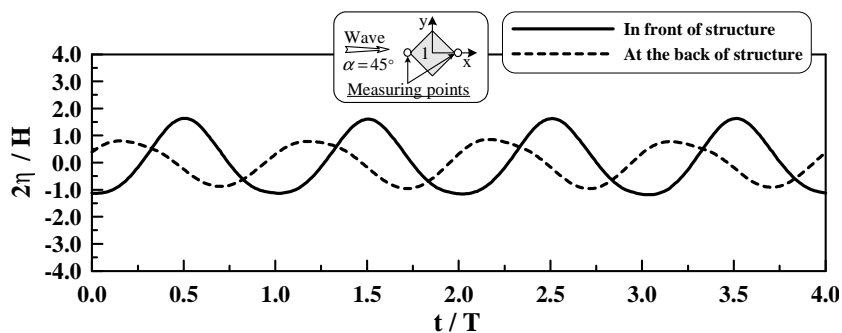


(b)  $e/B=1.75$

Fig. 3.53 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$  for vertical column with square section.



(a)  $e/B=1.25$



(b)  $e/B=1.75$

Fig. 3.54 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with square section.

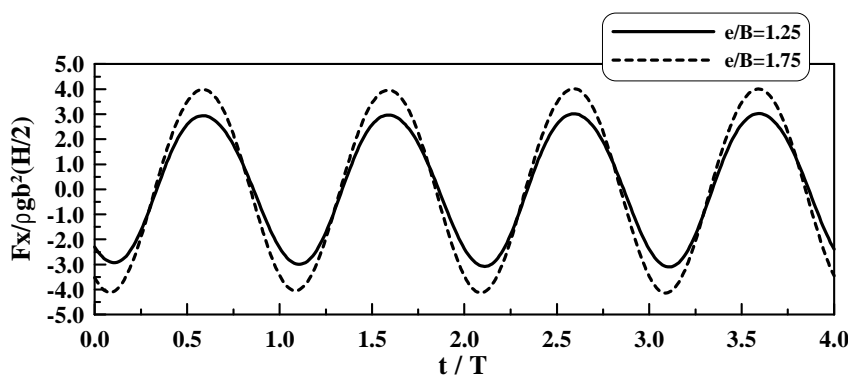


Fig. 3.55 Time variation of x-directional wave forces acting on vertical column with square section.

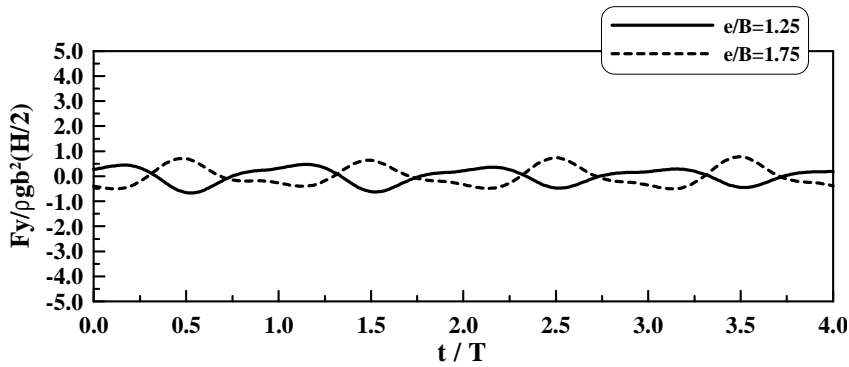


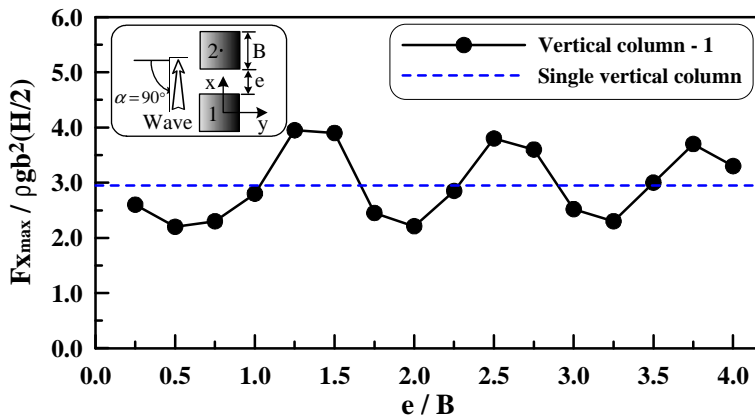
Fig. 3.56 Time variation of y-directional wave forces acting on vertical column  
with square section.

#### 4.3.3 입사파향각 $\alpha = 90^\circ$

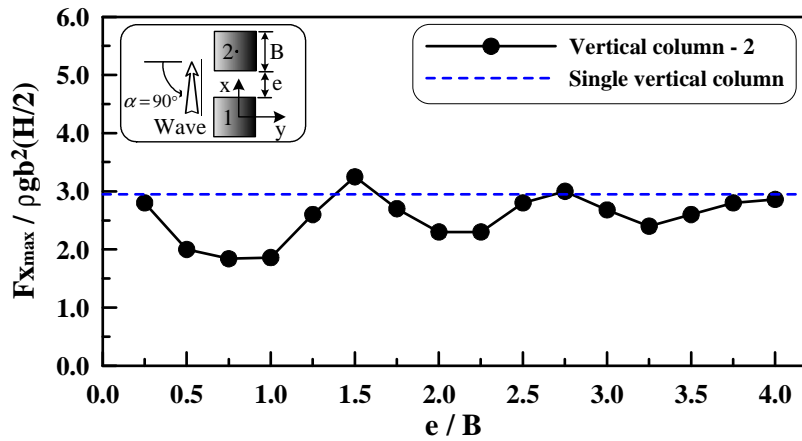
Fig. 3.57은 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물을 대상으로 입사파가  $90^\circ$ 로 입사하는 경우에 구조물의 배치간격에 따른 무차원최대파력  $F_{\max}/\rho g a^2(H/2)$ 의 변화특성을 나타낸 결과로, Fig. 3.57(a)는 파진행방향의 전면에 설치된 구조물 1의 경우이며, Fig. 3.57(b)는 파진행방향의 후면에 설치된 구조물 2의 경우이다. 원형단면의 경우와 동일하게 구조물 1의 경우 구조물의 배치간격에 따른  $F_x$ 는 단수연직주상구조물의  $F_x$ 를 중심으로 크게 변동하며, 구조물 2의 경우는 대부분이 단수연직주상구조물  $F_x$  이하의 범위에서 변동하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 구조물 1에 의한 회절산란파의 영향이 구조물 2에 미친 결과로 판단되며, 원형단면에 비해 정사각형단면의 연직주상구조물에서 보다 큰 변동을 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고, 구조물 1의 경우 구조물의 배치간격이 약 0.63의 정수배 되는 지점의 부근으로, 파력의 극대, 극소가 반복되며, 이는 구조물간의 거리가 입사파장  $L$ 의 약  $1/4$ 배가 되는 거리에 해당하는 것임을 알 수 있다. 전체적으로 파진행방향의 전면에 놓여진 구조물의 단면형상에 따라 구조물 1의 경우에는 원형단면에 비해 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물이, 구조물 2의 경우에 대해서는 정사각형단면에 비해 원형단면을 갖는 연직주상구조물에서 보다 큰  $F_x$ 를 나타내는 것을 알 수 있고, 구조물의 배치간격이 일정거리 이상에서는 단수연직주상구조물에 대한  $F_x$ 에 근접하게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.58은 파진행방향의 전면에 설치된 구조물 1에서  $x$ 방향의  $F_x$ 가 작게 나타나는 구조물의 배치간격( $e/B=2.0$ )과 크게 나타나는 구조물의 배치간격( $e/B=2.5$ )에 대한 무차원 최대수면상승고  $2\eta_{\max}/H$ 의 공간분포를 나타낸 그림이다. 무차원최대수면상승고의 변화 특성을 살펴보면 구조물의 배치간격에 따라 구조물의 주변에서 부분중복파는 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 3.58(a)의 경우 부분중복파가 구조물 1의 양측면과 전면에서 형성되고, 구조물 2와의 상호간섭으로 구조물의 배후면에서는 수면상승고가 복잡하게 되는 것을 알 수 있다. 반면에, Fig. 3.58(b)의 경우는 구조물 1의 전면에서 부분중복파가 집중적으로 형성되어 구조물의 전면에서 큰 수면상승고를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 구조물간의 상호간섭현상에 따른 수면상승고의 변화특성을 보다 상세히 살펴보기 위하여 구조물 1의 전면과 배후면에 설치된 수위계로부터 얻어진 수면상승고의 시간변화를 Fig. 3.59에 나타내었다. 결과를 살펴보면 구조물의 전면에서는 부분중복파가 형성되어 높은 수면상승고를 나타내는 것을 알 수 있고, 구조물의 배치간격이 상대적으로 넓은 Fig. 3.59(b)의 경우는 위상차이로 인하여 구조물의 전면과 후면에서 수위차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

전술한 구조물의 배치간격에 따른 구조물의 주위에서 수면상승고의 차이로 나타나는  $F_x$ 의 시간변화를 Fig. 3.60에 나타내었다. 구조물의 배치간격이 넓은  $e/B=2.5$ 인 경우가 구조물의 전면과 후면에서 수위차이로 발생하는 파력의 시간변화에 있어서 큰 값을 나타냄을 알 수 있다.

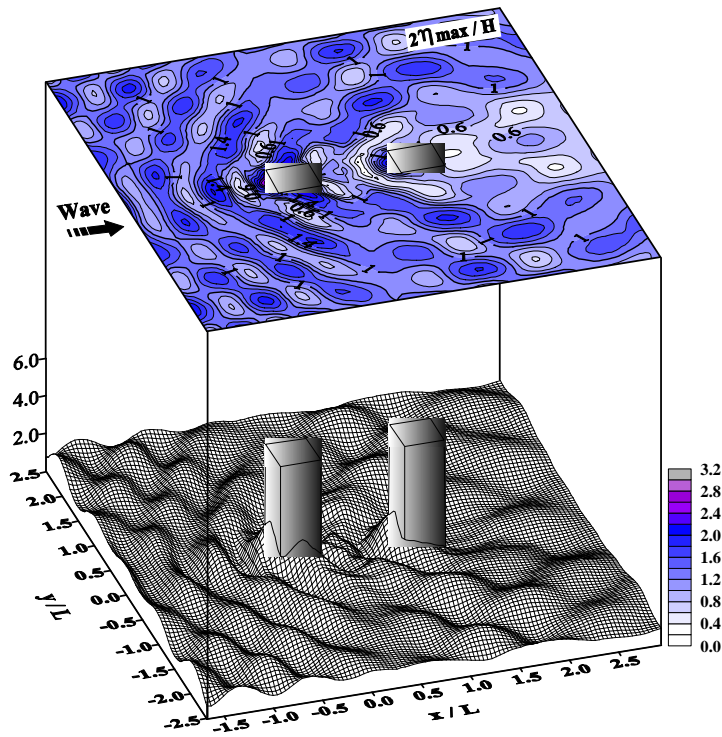


(a) Vertical column 1

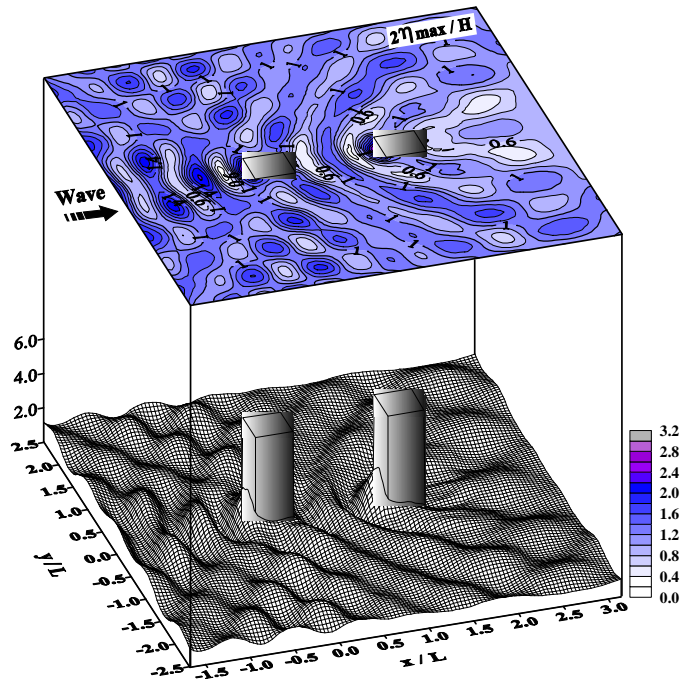


(b) Vertical column 2

Fig. 3.57 Variation of x-directional maximum wave forces acting on vertical column with square section.

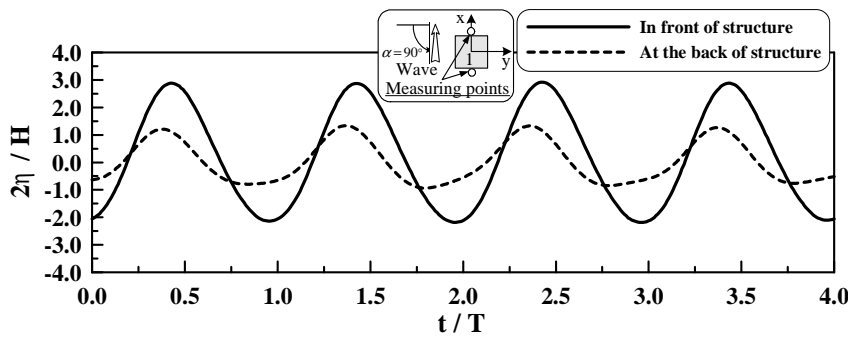


(a)  $e/B=2.0$

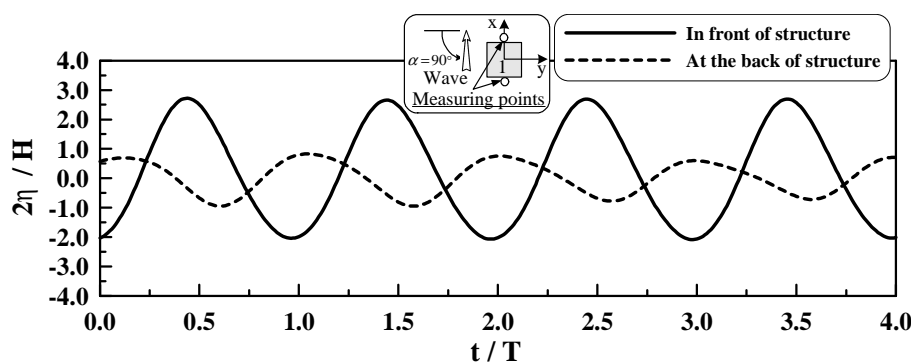


(b)  $e/B=2.5$

Fig. 3.58 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{\max}/H$  for vertical column with square section.



(a)  $e/B=2.0$



(b)  $e/B=2.5$

Fig. 3.59 Time variation of non-dimensional water levels for vertical column with square section.

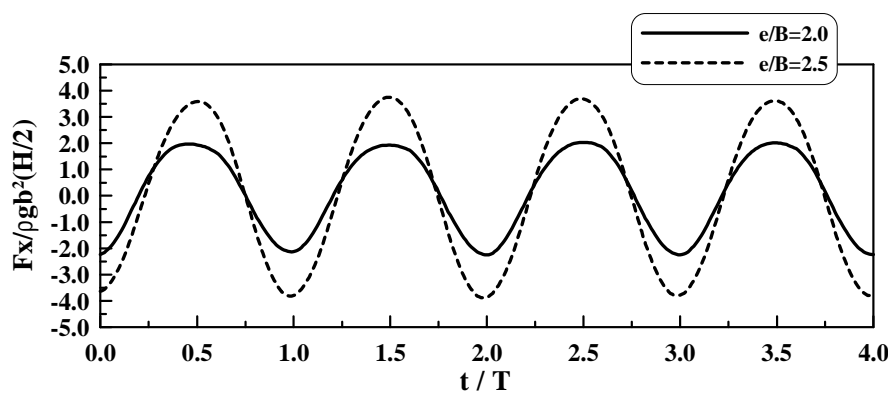


Fig. 3.60 Time variation of non-dimensional wave forces acting on vertical column with square section.

## 5. 결론

본 장에서는 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 자유수면의 추적에 3차원 VOF법 (Full-nonlinear 해석법)을 적용하여 비쇄파시에 원형단면 및 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물에 대하여 구조물에 작용하는 비선형파력 및 비선형파랑변형의 특성을 검토하였다. 파랑변형 및 파력에 대한 본 3차원수치해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 수치계산결과를 기존의 수리모형실험 및 수치계산결과와 비교·검토하였으며, 이로부터 좋은 대응성을 확인할 수 있었다.

원형단면 및 정사각형단면을 갖는 복수연직주상구조물의 배치간격과 입사파향각의 변화에 따른 구조물에 작용하는 비선형파랑변형 및 비선형파력의 특성을 해석하여 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1)3차원파동장에 설치된 연직주상구조물과 파랑과의 비선형상호작용에 따른 연직주상구조물의 주변에서 파랑변형 및 구조물에 작용하는 파력의 특성을 수치계산결과 및 수리실험결과와 비교·검토하여 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2)Navier-Stokes 방정식의 계산방법으로 본 연구에서 적용하는 수치해석기법인 Two-step projection법은 기존의 HSMAC기법과 비교하여 매우 효율적인 방법으로 판단된다.

(3)본 연구에서 검토한 원형단면 및 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물에 있어서 구조물의 전면에서는 부분중복파의 영향으로 높은 수면상승고를, 구조물의 배후면에서는 상대적으로 낮은 수면상승고를 나타냈다. 또한, 구조물의 전면과 배후면에서 수면상승고의 시간변화에는 위상차이를 보이며, 특히 구조물의 배후면에서 수면상승고에 대한 시간변화는 구조물간의 간섭현상 및 회절산란파의 영향으로 비선형성이 크게 나타났다.

(4)복수연직주상구조물의 배치간격의 변화에 따른 구조물의 표면둘레에서 최대수면상승고는 구조물에 의한 회절산란파의 영향과 구조물간의 비선형간섭으로 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있었다.



(5)구조물의 배치간격에 따른 복수연직주상구조물에 작용하는 각 성분파력의 변화는 구조물의 배치간격이 일정거리 이상으로 되면 단수연직주상구조물의 각 성분파력에 근접하게 되는 것을 알 수 있었다.

(6)입사파향각  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우에 복수연직주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 는 구조물의 배치간격에 큰 영향은 받지 않았으며, 파력의  $y$ 방향성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격에 따라 파력의 크기에 큰 변화를 나타내었다. 특히, 파력의 연직성분  $F_y$ 는 구조물의 배치간격이 가장 좁은 경우에서 최대파력을 나타낸 후, 구조물의 배치간격이 넓어질수록 파력이 감소하며, 구조물간의 거리가 입사파장  $L$ 에 해당하는 배치간격에서는 파력이 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

(7)입사파향각  $\alpha = 45^\circ$ 인 경우 복수연직주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 는 파진행방향의 우측에 설치된 구조물의 경우가 파진행방향의 좌측에 설치된 구조물에 비해 구조물의 배치간격에 보다 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었고, 파진행방향의 우측에 설치된 구조물에 비해 파진행방향 좌측에 설치된 구조물의 경우가 더 좁은 구조물 배치간격의 범위에서 단수연직주상구조물에 대한  $F_x$ 에 더 빨리 근접하는 것을 알 수 있었다.

(8)입사파향각  $\alpha = 45^\circ$ 인 경우에 구조물의 배치간격에 따른 파진행방향의 우측에 설치된 구조물의 경우에 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 가 최대로 나타나는 구조물의 배치간격은  $e/D$  및  $e/B$ 가 1.75의 정수배 되는 지점의 부근이며, 구조물간의 거리를 파진행방향에 대해 투영한 거리가 입사파장  $L$ 의 약 1/2배 되는 거리에 해당하는 것을 알 수 있었다.

(9)입사파향각  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에 파진행방향의 전면에 설치된 연직주상구조물에 대한 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 는 구조물의 배치간격에 따라 단수연직주상구조물의  $F_x$ 를 중심으로 변동하는 반면, 파진행방향의 배후면에 설치된 연직주상구조물에 대해서는 대부분이 단수연직주상구조물의  $F_x$  이하값에서 변동하는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 파진행방향의 전면에 설치된 연직주상구조물의 단면형상에 따라 상이하며, 원형단면에 비해

정사각형단면을 갖는 연직 주상구조물에 대해 보다 명확히 나타났다.

(10) 입사파향각  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에 파진행방향의 전면에 설치된 연직주상구조물에 작용하는 파력의  $x$ 방향성분  $F_x$ 의 최대치가 나타나는 구조물의 배치간격은 구조물의 배치간격이 1.25의 정수배 되는 지점의 부근이며, 구조물간의 거리가 입사파장  $L$ 의 약  $1/2$ 배가 되는 거리에 해당하는 것을 알 수 있었다.

(11) 연직주상구조물을 실해역에 설치할 경우에 파랑조건에 따라 구조물의 배치간격을 적절히 조절함으로써 작용파력 및 주변파동장을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

## <참고문헌>

- Chakrabarti, S.K. and Tam, W.A. (1975) : Interaction of waves with large vertical cylinder, J. Ship Res., 19, pp.23-33.
- Chorin, A.J. (1968) : Numrical solution of the Navier-Stokes equations, Math. Comp., 22, pp.745-762.
- Fletcher, C.A.J. (1991) : Computational techniques for fluid dynamics Volume II, Springer-Verlag, pp.494.
- Goda, Y. (1983) : An unified nonlinearity parameter of water waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., 22(3), pp.3-30.
- Hinatsu, M. (1992) : Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface, J. Kansai Soc. Nav. Archit. Japan, 217, pp.1-11.
- Molin, B. (1979) : Second-order diffraction loads upon three-dimensional bodies, Applied Ocean Res., Vol. 1, No. 4, pp. 197-202.
- 喜岡 涉, 石田 昭 (1984) : 円柱に作用する第2次近似回折波波力, 海岸工学講演会論文集, 31, pp.620-624.
- 増田光一, 坂田親弘, 加藤 涉 (1986) : 複数の柱状體に作用する非線形波力に関する研究, 造船學會誌, 第160号, pp. 176-184.
- 村上啓介, 吉田明德, 入江 功 (1993) : 任意斷面形狀の鉛直柱体と波の非線型干涉解析法, 海岸工学論文集, 40(2), pp.846-850.

- ・ 眞田 武 (1998) : 大型海洋構造物による非線形回折散亂波の2次近似解析解とその応用に関する研究, 工学博士學位論文, 名古屋大學大學院.

---

# 4장

## 쇄파후 Full-nonlinear해석법에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석

---

### 1. 개요

연안역에서 쇄파가 직접적으로 작용하는 지점보다는 가능한 한 쇄파점 이후의 해역에 구조물을 설치하는 것이 작용파력의 감소로 인한 구조물의 안정성 측면에서 합리적이다. 따라서, 쇄파후의 파동장에 구조물의 안정성을 충분히 확보하고, 구조물의 설치로 인한 주변파동장의 변화를 정확히 예측하기 위해서는 연직주상구조물과 같은 구조물에 작용하는 비선형파력 및 비선형파랑변형의 특성을 면밀히 검토할 필요가 있다.

쇄파의 영향을 고려한 3차원파력의 산정에 대한 연구로는 투과성잠제위에 설치된 구조물에 대하여 해석한 연구가 있다(Hur, 2003, 2004). 본 연구에서는 경사수역과 일정수역으로 이루어진 3차원파동장을 고려하며, 파고의 변화에 따라 쇄파가 경사수역 또는 일정수역에서 발생하여 연직주상구조물에는 쇄파후의 파랑이 작용하는 경우만을 한정한다. 여기서, 쇄파가 직접적으로 연직주상구조물에 작용하는 경우도 해석이 가능하지만, 쇄파시에 진행되는 기포, 기포로 인한 완충작용 및 쇄파충격력 등과 같은 현상은 본 연구에서 적용하는 해석법으로는 정확히 규명될 수 없을 것으로 판단되기 때문이다. 따라서, 쇄파후의 3차원파동장에 설치된 연직주상구조물에 작용하는 파력과 파랑변형을 해석하기 위하여 제 3장에서 상술한 Full-nonlinear해석법(3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF법을 접합한 해석법)을 적용한다. Navier-Stokes의 운동방정식과 VOF법에 관한 이론이 제 3장에서 상세히 기술되어 있기 때문에 본 장에서는 생략하는 것으로 한다.

여기서는 일정수심역에 대형연직주상구조물을 설치한 경우에 있어서, 구조물의 위치 변화, 파고변화, 쇄파발생유무 및 쇄파발생위치에 따른 구조물에 작용하는 비선형파력 및 비선형파랑변형의 특성을 검토하고, 쇄파후에 파랑에너지의 감쇠정도를 구조물에 작용하는 파력특성과 연관하여 검토한다.

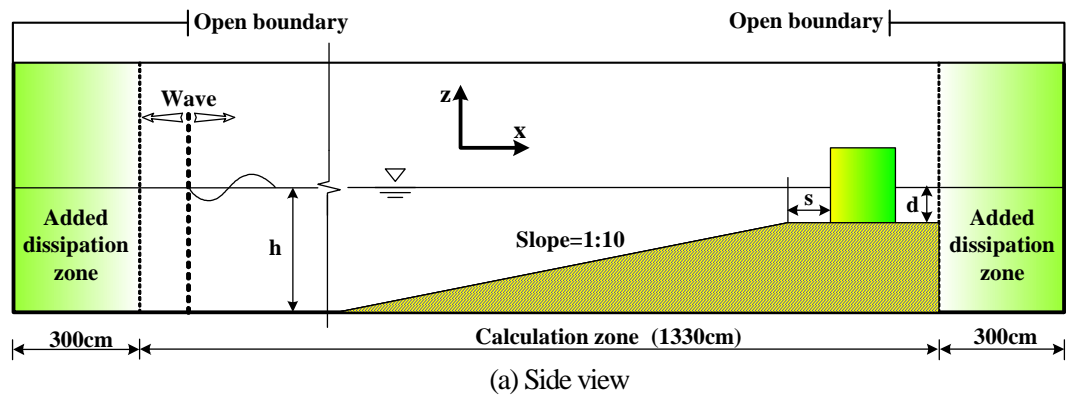
## 2. 수치해석

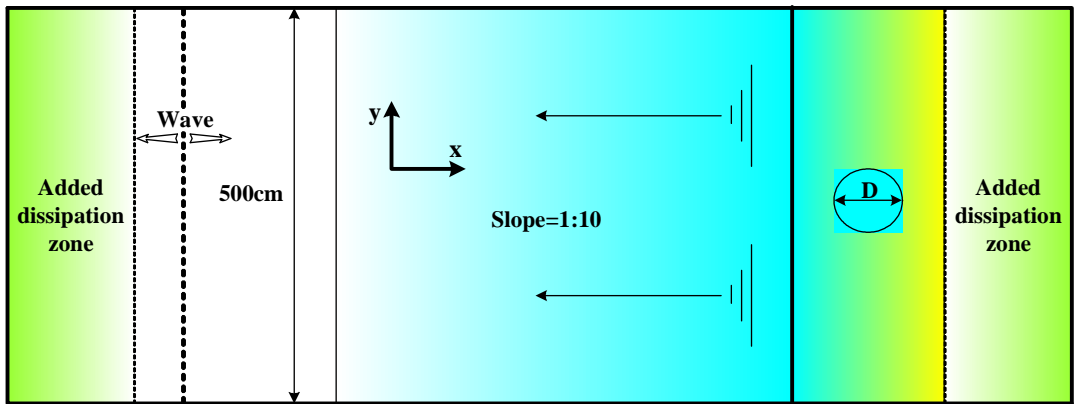
### 2.1 구조물 및 해저의 조건

3차원파동장에서 경사면을 지나 일정수심이 유지되는 영역에 설치된 원형의 단면형상을 갖는 연직주상구조물을 대상으로 입사파고 및 일정수심영역의 수심변화에 따라 원주구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형의 특성을 고찰한다. 수치해석에 적용된 입사파조건, 경사면의 경사도, 일정수심역의 수심 및 구조물의 체원을 다음의 Table 4.1, Fig. 4.1 및 Fig. 4.2에 각각 제시한다.

Table 4.1 Conditions of numerical analysis for circular column.

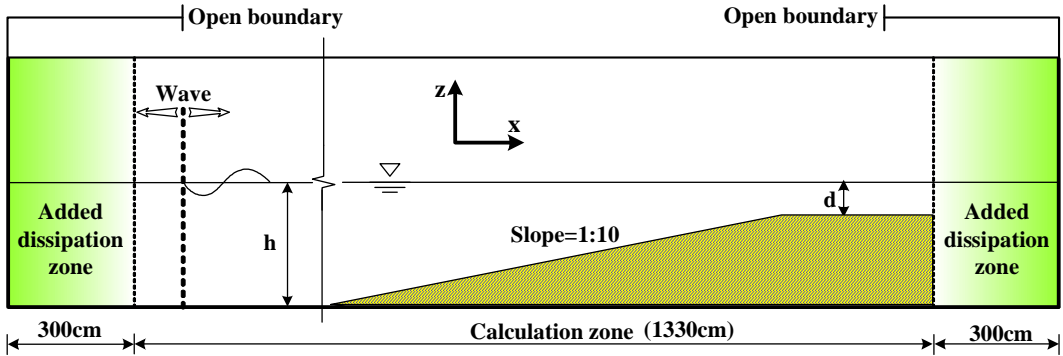
Shape of structure	Slope	$T(s)$	$H(cm)$	$h(cm)$	$D(cm)$	$H/L$	$d(cm)$	$S(cm)$
Circular column	1:10	1.4	from 5 to 10 (step:1cm)	30	60	0.028	4	180
	1:10	1.4	from 8 to 12 (step:1cm)	30	60	0.028	6	200



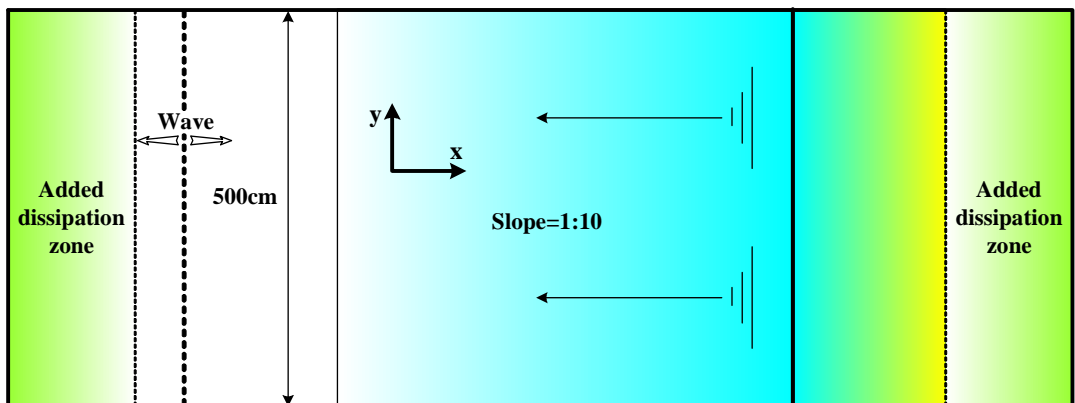


(b) Plan view

Fig. 4.1 Definition sketch of 3D numerical wave basin in case of installed circular column.



(a) Side view



(b) Plan view

Fig. 4.2 Definition sketch of 3D numerical wave basin in case of not installed circular column.

Fig. 4.1에서 경사면의 경사도는 1:10이고,  $S$ 는 경사면에서 일정수심역으로 바뀌는 지점(이하, 사면분기점)에서부터 구조물이 위치한 지점까지의 거리이다. Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 각각 구조물이 설치되지 않은 경우와 설치된 경우에 있어서 수치계산영역을 나타낸 것으로, 일정수심역의 수심  $d$ 가 4cm인 경우에 구조물의 위치는 사면분기점에서 180cm떨어진 곳에,  $d=6\text{cm}$ 의 경우는 사면분기점에서 200cm떨어진 곳에 구조물이 위치하고, 파형변화를 2차원적으로 표시하기 위한 단면을 계산영역의 중심인 Section A-A'와 B-B'로 하였다.

## 2.2 수치해석결과( $d=4\text{cm}$ )

### 2.2.1 파고변화에 따른 비선형파력의 특성

수치해석조건은 전술한 바와 같이 일정수심역의 수심  $d$ 가 4cm인 경우로, 일정수심역의 길이는 240cm이고, 원주구조물(직경  $D=60\text{cm}$ )은 사면분기점( $S=0\text{cm}$  or  $x=550\text{cm}$ )에서 180cm떨어진 곳에 위치한다. 파고를 5~10cm까지 변화시키면서 일정수심역에 위치한 원주구조물에 작용하는 비선형파력의 특성을 입사파가 경사면을 진행하면서 발생하는 파랑변형의 특성과 연계하여 고찰한다.

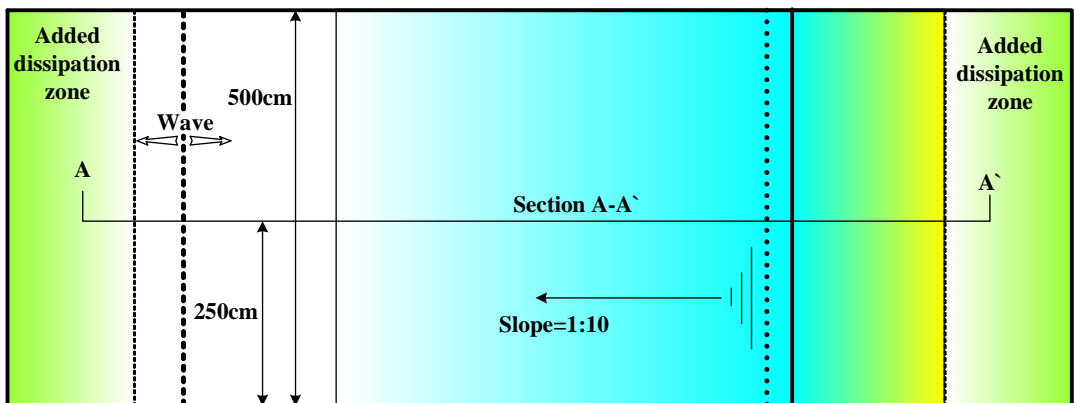


Fig. 4.3 Definition sketch of section A-A' in the 3D numerical wave basin  
in case of not installed circular column.



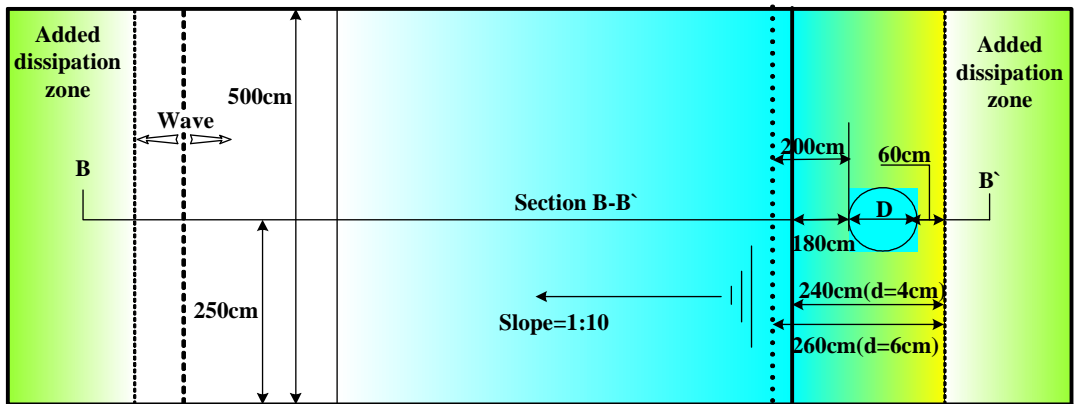


Fig. 4.4 Definition sketch of section B-B' in the 3D numerical wave basin  
in case of installed circular column.

Fig. 4.5는 Fig. 4.4에서 나타난 원주구조물에 있어서 파고의 변화에 따른 구조물에 작용하는 비선형파력의 변화특성을 나타낸 것이다.

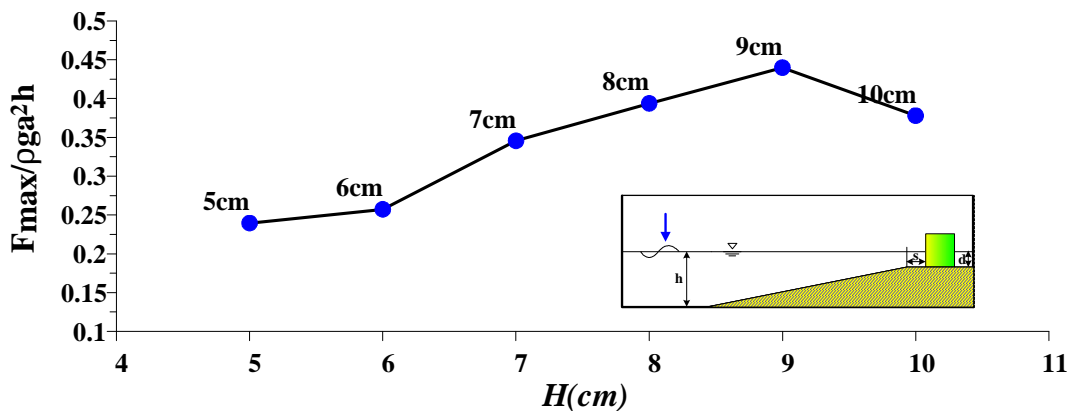


Fig. 4.5 The variation of non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular column according to the change of wave height( $d=4\text{cm}$ ).

Fig. 4.5를 보면 파고  $H$ 가 증가함에 따라 파력은 점차적으로 증가하는 경향을 나타내지만,  $H=9\text{cm}$ 에서 최대파력이 작용하고,  $H=10\text{cm}$ 에서는 파력이 감소하여  $H=8\text{cm}$ 의 경우보다 파력이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

일반적으로 파고가 높아짐에 따라 구조물에 작용하는 파력은 증가하지만, Fig. 4.5와

같이  $H=10\text{cm}$ 에서 파력이 감소되는 현상은 입사파랑이 경사면을 진행하면서 쇄파한계수심을 지나 파가 쇄파되고, 쇄파로 인한 파랑에너지의 손실로 일정수심역의 파동장에 위치한 구조물에 작용하는 파력이 감소되었기 때문이다. 따라서, 원주구조물에 작용하는 파력은 입사파랑의 쇄파발생여부, 쇄파발생위치 및 쇄파정도 등과 직접적인 관련성이 있는 것으로 판단되며, 다음에 서술하는 파랑변형의 특성을 통하여 쇄파의 발생위치와 구조물에 작용하는 파력과의 상관성 및 구조물의 위치변화에 따른 파력의 변화특성을 고찰한다.

### 2.2.2 파고변화에 따른 비선형파랑변형의 특성

경사면이 정수면까지 일정하게 경사진 경우에 파랑이 입사하면 Fig. 4.6에서 나타낸 바와 같이 4단계의 형태로 파가 변형되게 된다(Christensen et al, 2002). 본 연구에서와 같이 경사면의 배후에 일정수심역이 있는 경우에는 파랑에너지의 일부가 전달되기 때문에 Fig. 4.6과는 조금 상이하므로 파고와 일정수심영역의 수심에 따라 파가 쇄파되는 단계가 Deformation, Outer breaking zone, Inner breaking zone, Swash zone의 어느 단계까지만 진행될 것이다.

Fig. 4.7~Fig. 4.14는  $H=9\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ 에서 구조물의 유무에 따라 파랑변형을 한 주기의 파랑에 대해  $t/T=1/40$ 의 간격으로 나타낸 것이며, 이로부터 쇄파의 시작과 종료위치, 쇄파의 지속시간을 요약하여 Table 4.2에 제시한다.

Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 일정수심역의 수심  $d$ 가 4cm이고, 파고  $H$ 가 구조물에 최대파력이 작용하는 9cm인 경우에 파랑의 변화과정을 전계산영역에 대해서 나타낸 것으로, Fig. 4.7은 구조물이 설치되지 않은 경우이고, Fig. 4.8은 구조물이 설치된 경우이다. 두 결과로부터 구조물의 설치유무에 따라 파랑변형에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있으며, 이는 구조물에 의한 반사파의 영향으로 판단된다. 구조물의 존재가 파랑변형에 미치는 영향을 상세히 알아보기 위하여 Fig. 4.9에 전계산영역중의 일부영역  $x=450\sim 750\text{cm}$ 에서 파랑변형을 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 4.9(a)는 구조물이 설치되지 않은 경우이고, Fig. 4.9(b)는 구조물이 설치된 경우로, 쇄파가 발생하는 시점에서 쇄파가 종료되는 시점까지를 나타낸 것이다.

Fig. 4.9(a)에서 쇄파가 발생하는 시점과 지점은  $t/T=9/40$ 일 때  $x \approx 525\text{cm}$ 이며, 사면분기점( $S=0\text{cm}$  or  $x=550\text{cm}$ )의 이전인  $x \approx 540\text{cm}$ 에서 쇄파가 종료된다. Fig. 4.9(b)는 구조물이 설치된 경우로, 구조물이 없는 Fig. 4.9(a)의 경우와 비교하면 구조물에 의한 반사파의 영향으로 쇄파파형에 차이가 발생하며, 후술하는 바와 같이 파고가 높아지거나, 일정수심영역의 수심  $d$ 가 깊어질수록 구조물에 의한 반사파의 영향이 커지기 때문에 구조물의 유무에 따른 파형에서 차이가 크게 나타난다.

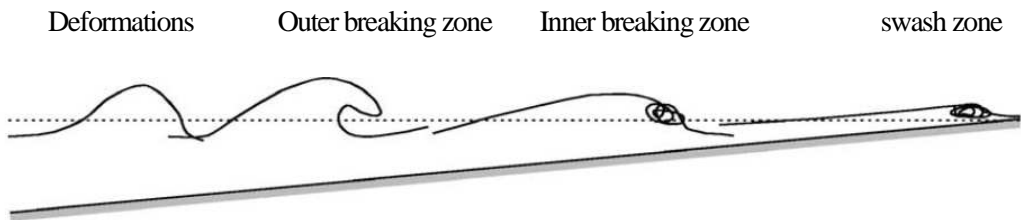


Fig. 4.6 The surf zone divided into the shoaling/deformation zone, outer breaking zone, inner breaking zone, swash zone

Table 4.2 Summary of wave breaking point and duration time in case of  $H=9\text{cm}$  and  $10\text{cm}$ .

Wave height (cm)	Structure	Initiation point of wave breaking (cm)	Termination point of wave breaking (cm)	Duration time( $t/T$ )	End of slope $x$ (cm)
9	not installed	525	540	9/40~14/40	550
	installed	525	540	9/40~14/40	
10	not installed	510	535	5/40~11/40	
	installed	510	540	5/40~12/40	

Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 Fig. 4.5에서 파력이 감소하는  $H=10\text{cm}$ 인 경우에 전계산영역에서 구조물의 유무에 따른 파랑변화를 나타낸 것이다. 그리고, Fig. 4.12는 구조물의 유무에 따른 파형변화의 차이를 상세히 나타내기 위하여 전계산영역중에 일부영역  $x=450\sim 750\text{cm}$ 에서 파형변화를 나타낸 것이다. 여기서,  $H=9\text{cm}$ 인 경우와 비교하면 파형변화에서 차이는 쇄파의 종료시점이  $H=9\text{cm}$ 의 경우는 구조물이 있는 경우와 없는 경우가 비슷하게 나

타나지만,  $H=10\text{cm}$ 의 경우는 구조물이 없는 경우와는 상이하게  $t/T=11/40$ 에서도 쇄파가 나타나며, 특히  $t/T=11/40$ 에 있어서는 구조물의 유무에 따라 파형변화에 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 파고가 커짐에 따라 구조물에 의한 반사파가 파형변화에 미치는 영향이 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 4.13는 각각  $H=9\text{cm}$  및  $H=10\text{cm}$ 인 경우에 구조물이 설치되는 얇은 상태에서 파형의 변화양상 및 쇄파의 발생위치를 비교하기 위해 나타낸 것이다. 먼저,  $H=9\text{cm}$ 의 경우에 쇄파발생위치는  $x \approx 525\text{cm}$ 이며, 쇄파가 종료되는 위치는  $x \approx 540\text{cm}$ 로, 사면분기점의 위치  $S=0\text{cm}$  or  $x=550\text{cm}$ 를 기준으로 쇄파종료위치와 약  $-10\text{cm}$ 의 차이가 발생한다.  $H=10\text{cm}$ 의 경우에 쇄파는  $x \approx 510\text{cm}$ 에서 시작하여  $x \approx 535\text{cm}$ 에서 쇄파가 종료된다. 쇄파의 발생시점에 있어서는  $H=9\text{cm}$ 의 경우는  $t/T=9/40$ 에서 쇄파가 시작되어  $t/T=14/40$ 에서 종료되지만,  $H=10\text{cm}$ 의 경우에는  $t/T=5/40$ 에서 쇄파가 시작되어  $t/T=11/40$ 에서 종료된다. 이로부터  $H=9\text{cm}$ 인 경우에 비해  $H=10\text{cm}$ 의 경우가 파고가 커짐에 따라서 쇄파가 발생하는 위치와 쇄파지속시간에서도 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.14는 구조물이 설치된 경우에  $H=9\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ 일 때 파랑변화를 나타낸 것이다.  $H=9\text{cm}$ 의 경우에 구조물이 없는 경우와 비교하면 쇄파시작위치  $x \approx 525\text{cm}$  및 쇄파종료시점  $t/T=14/40$ 과 위치  $x \approx 540\text{cm}$ 는 구조물의 유무에 관계없이 비슷한 값을 나타내며,  $H=10\text{cm}$ 의 경우에 있어서는 쇄파의 시작위치와 종료위치가 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나, 파형의 변화에 있어서는  $H=10\text{cm}$ 의 경우가 구조물에 의한 반사파의 영향이 커짐에 따라 쇄파파형의 변화도 크기 때문에 파형변화가  $H=9\text{cm}$ 의 경우에 비해 구조물의 유무에 따라 쇄파형태 및 파랑변형의 정도가 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

쇄파의 발생위치와 구조물에 작용하는 파력과 상관계는 후술하는 구조물의 위치 변화에 따른 파력양상의 변화에서 알 수 있는 바와 같이 경사면상에서 쇄파의 발생위치가 파랑에너지의 감소정도와 상관성이 있으며, 쇄파의 발생위치가 사면분기점에서 멀어질수록 그리고 쇄파파형의 변형정도가 클수록 파랑에너지의 감소율이 크기 때문에 파고가 증가하여도 구조물에 작용하는 파력에서 그 값이 작게 나타나는 것으로 판단된다.

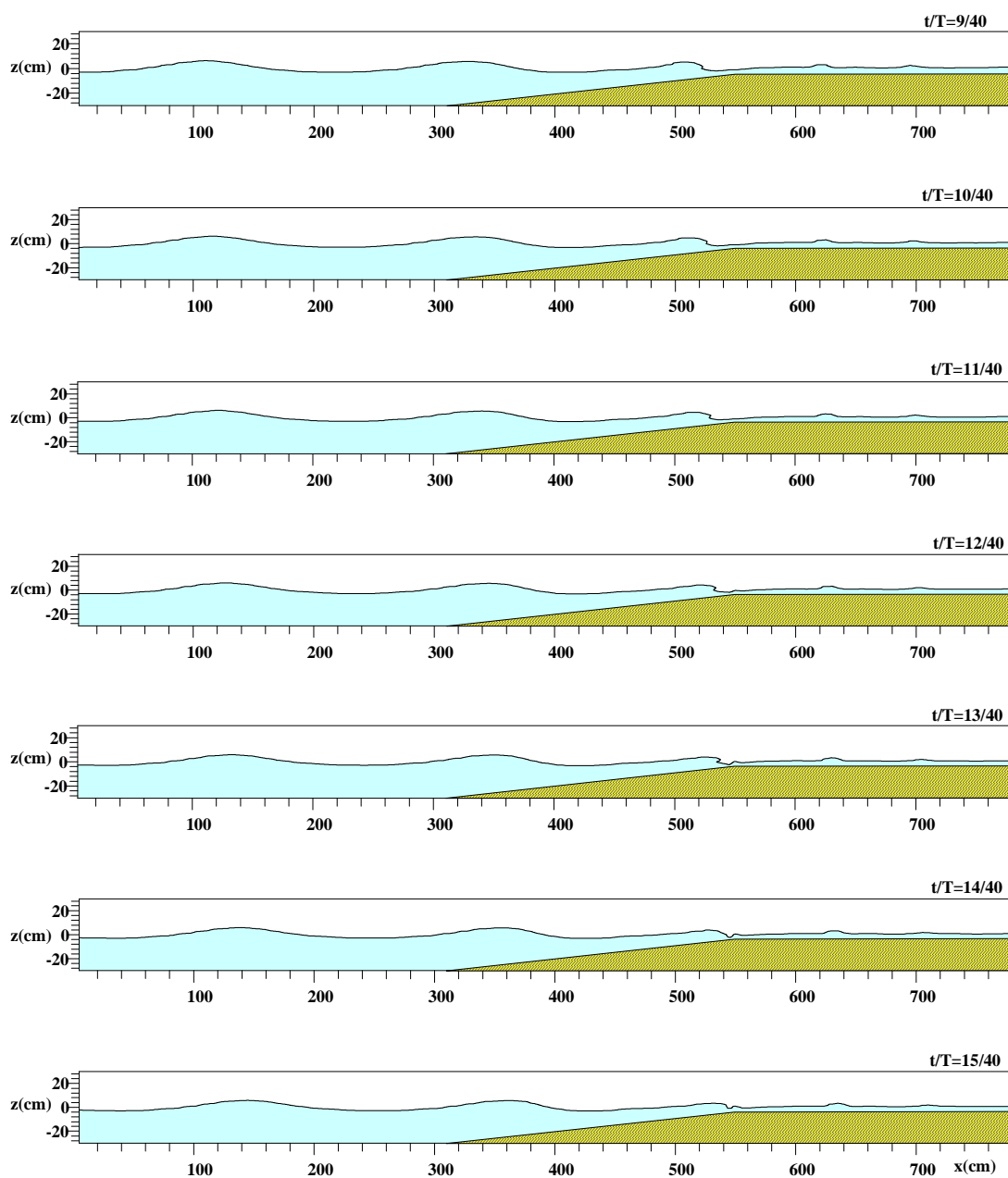


Fig. 4.7 Free surface evolution in case of not installed circular column

( $t/T=9/40\sim15/40$ ,  $H=9.0\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ).

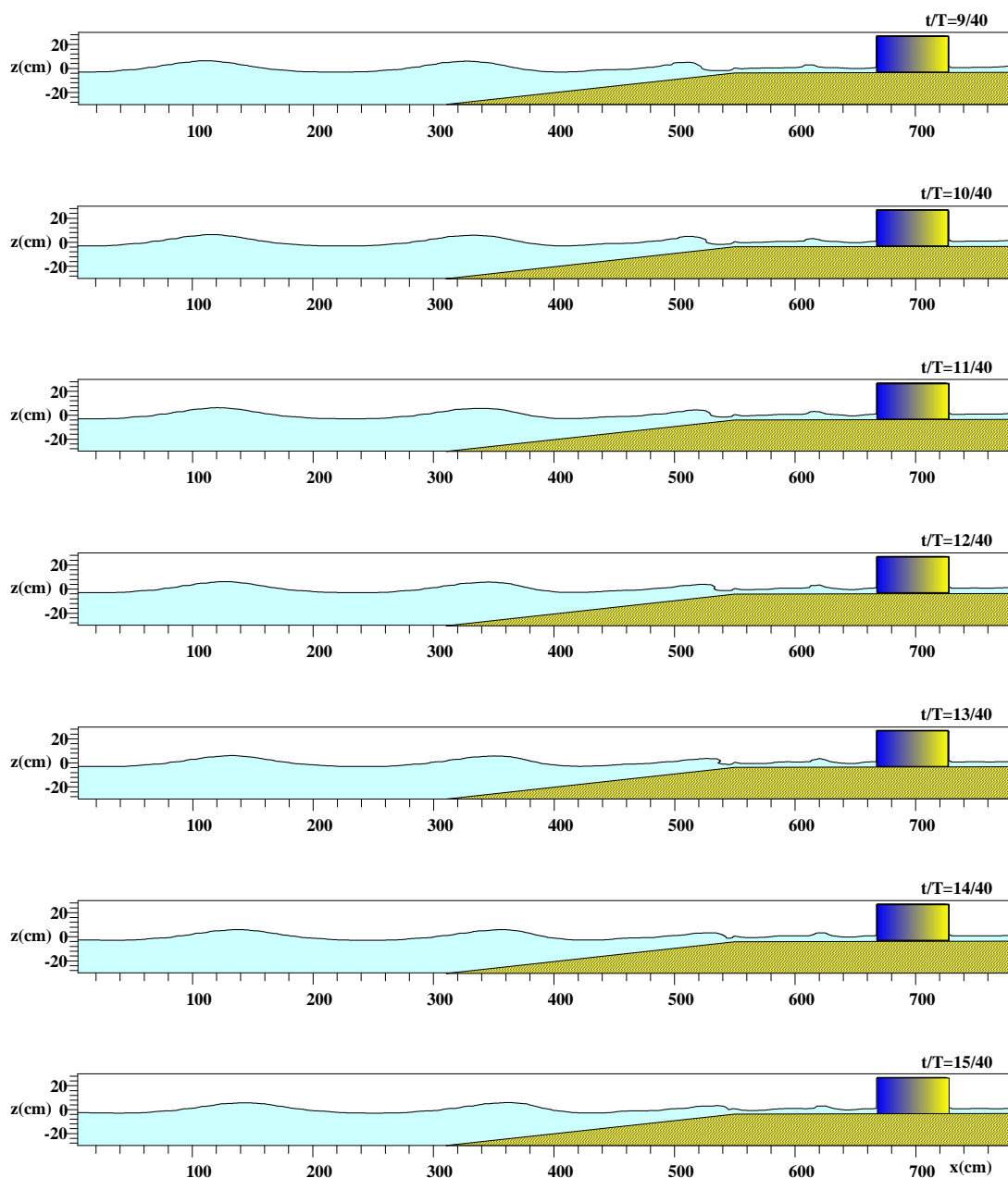
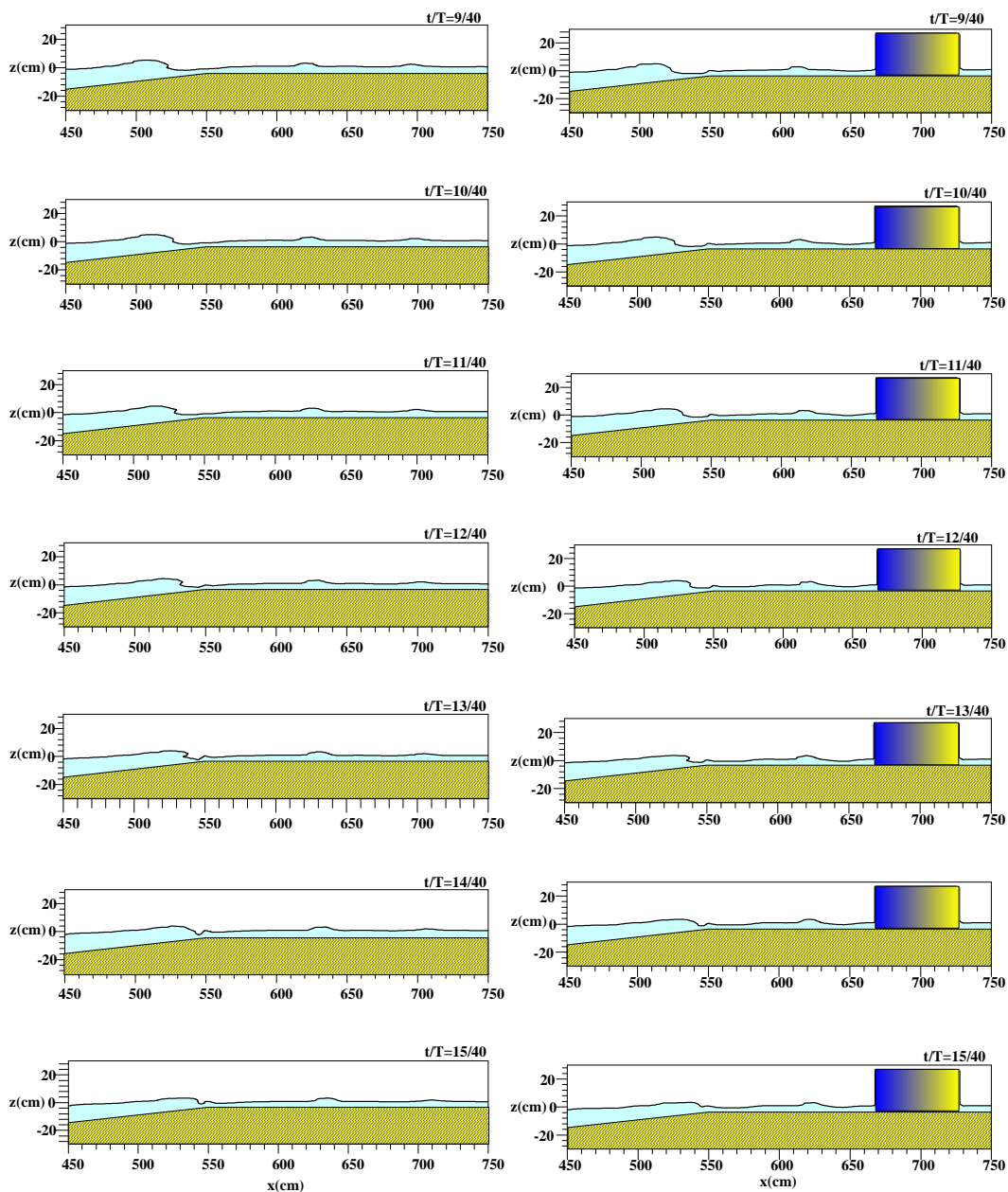


Fig. 4.8 Free surface evolution in case of installed circular column  
 $(t/T=9/40 \sim 15/40, H=9.0\text{cm}, d=4\text{cm})$ .



(a) in case of not installed circular column  
( $t/T=9/40 \sim 15/40$ ).

(b) in case of installed circular column  
( $t/T=9/40 \sim 15/40$ ).

Fig. 4.9 Free surface evolution in limited region  $x = 450 \sim 750$  cm ( $H=9.0$  cm,  $d=4$  cm).

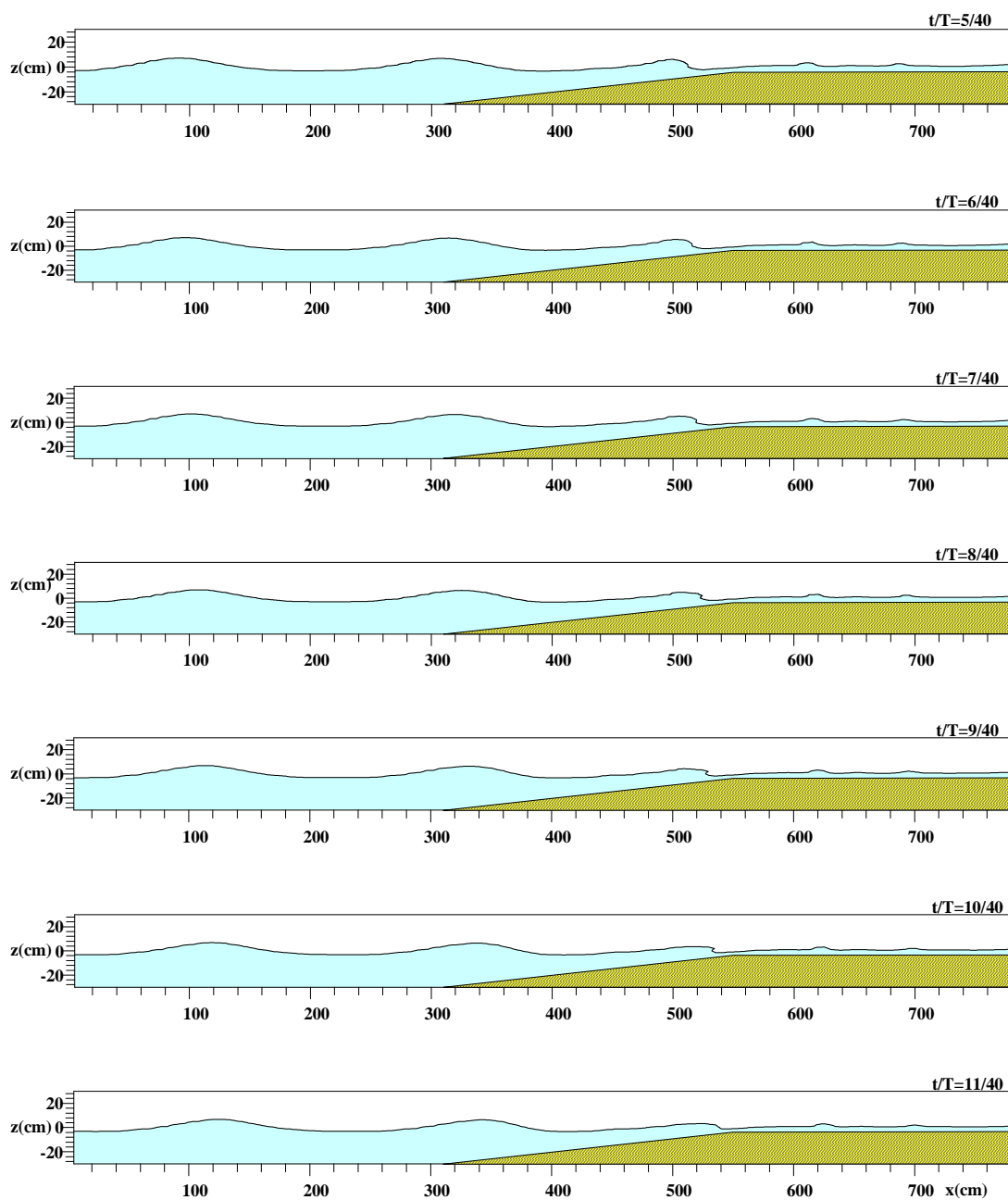


Fig. 4.10 Free surface evolution in case of not installed circular column

( $t/T=5/40 \sim 11/40$ ,  $H=10.0\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ).



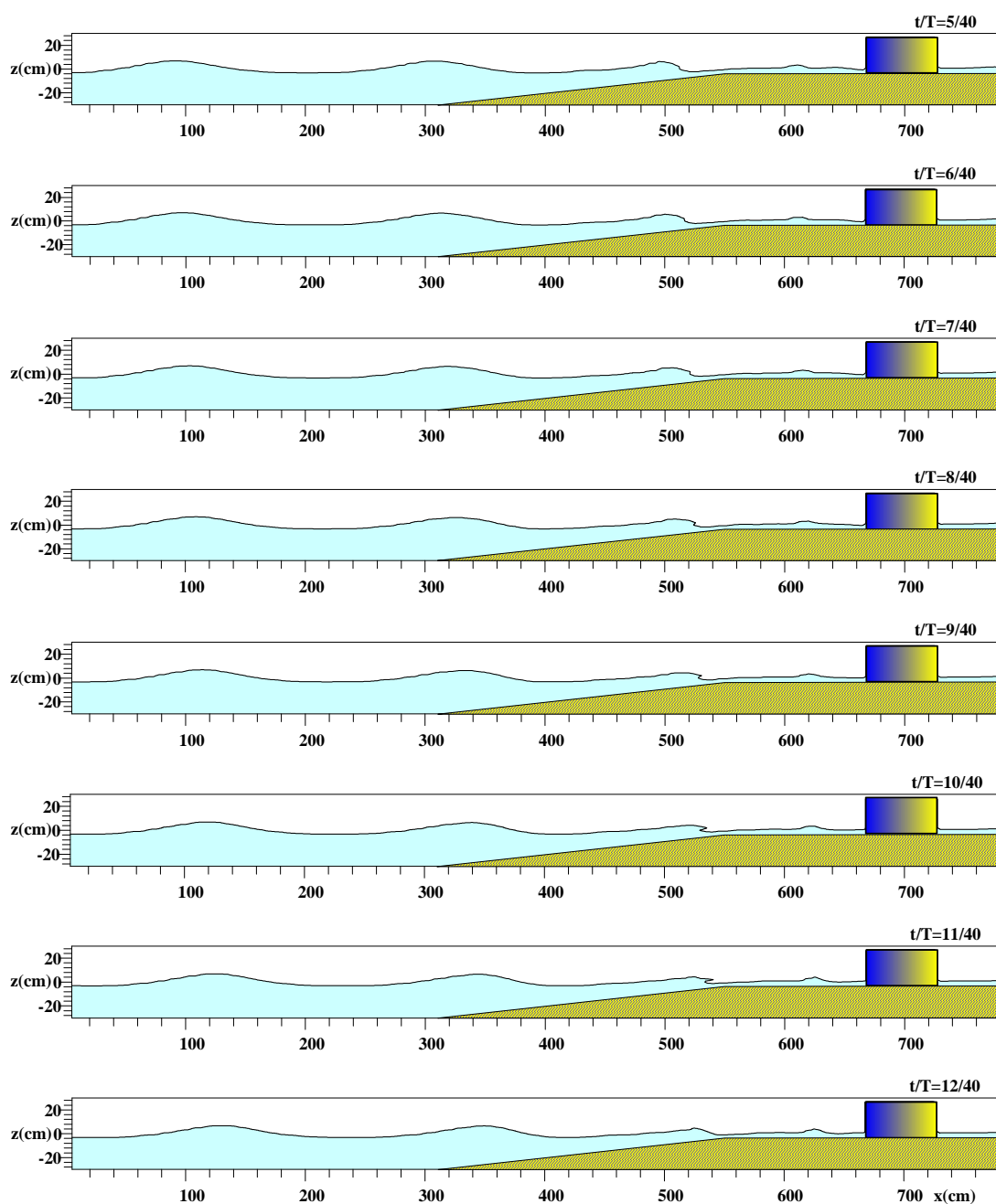
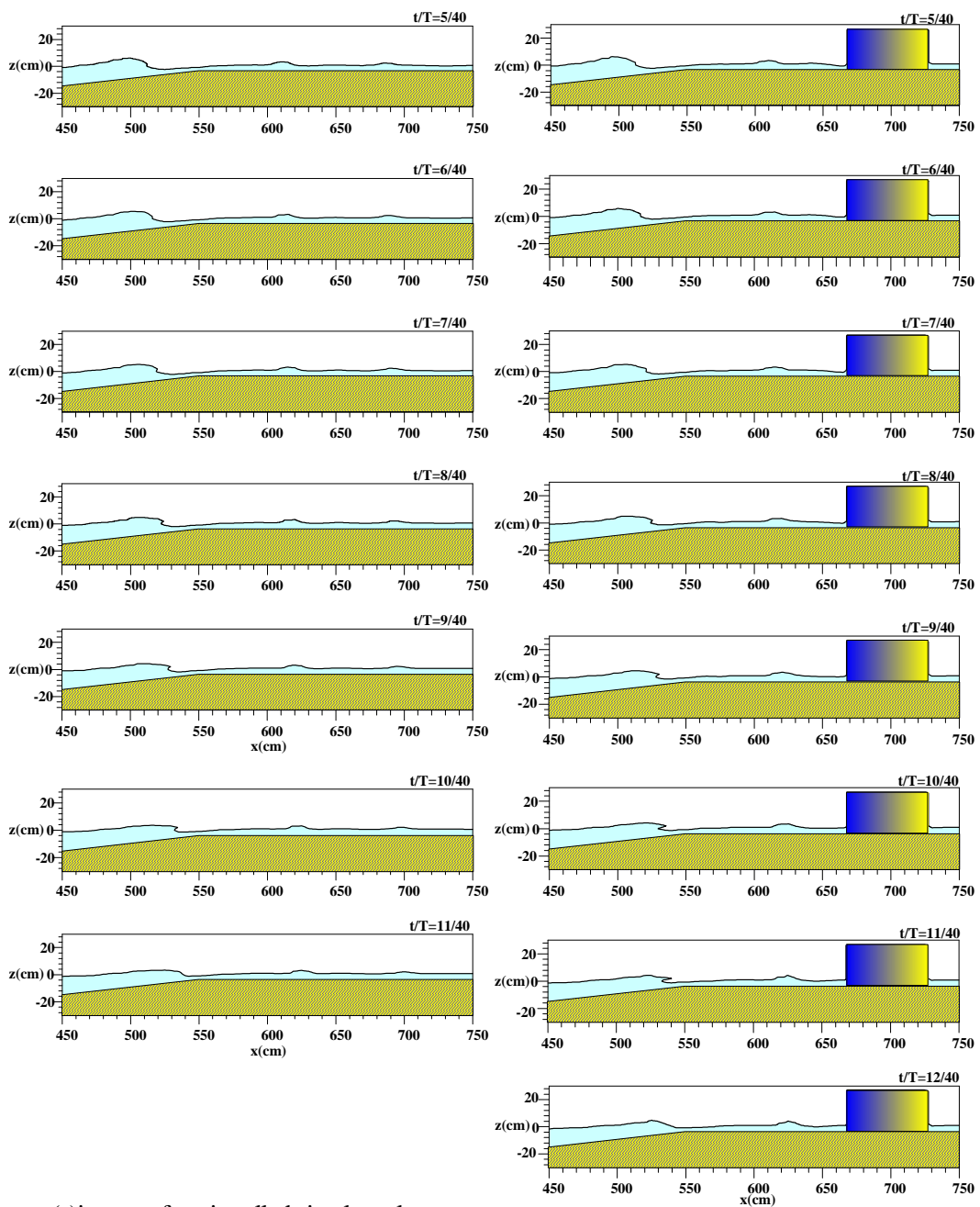


Fig. 4.11 Free surface evolution in case of installed circular column

( $t/T=5/40 \sim 12/40$ ,  $H=10.0\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ).

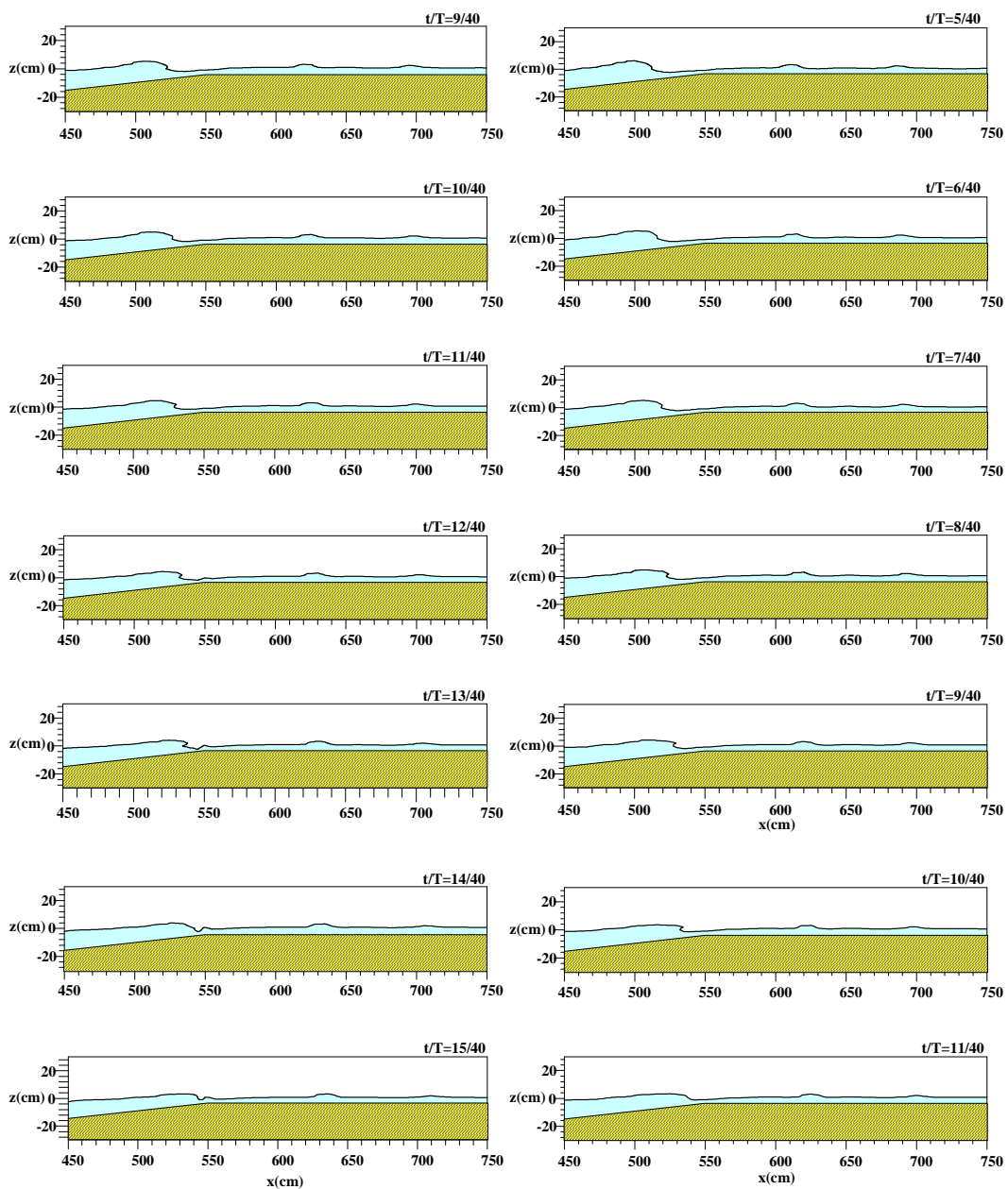


(a) in case of not installed circular column  
( $t/T=5/40 \sim 11/40$ ).

(b) in case of installed circular column  
( $t/T=5/40 \sim 12/40$ ).

Fig. 4.12 Free surface evolution in limited region  $x = 450 \sim 750$  cm

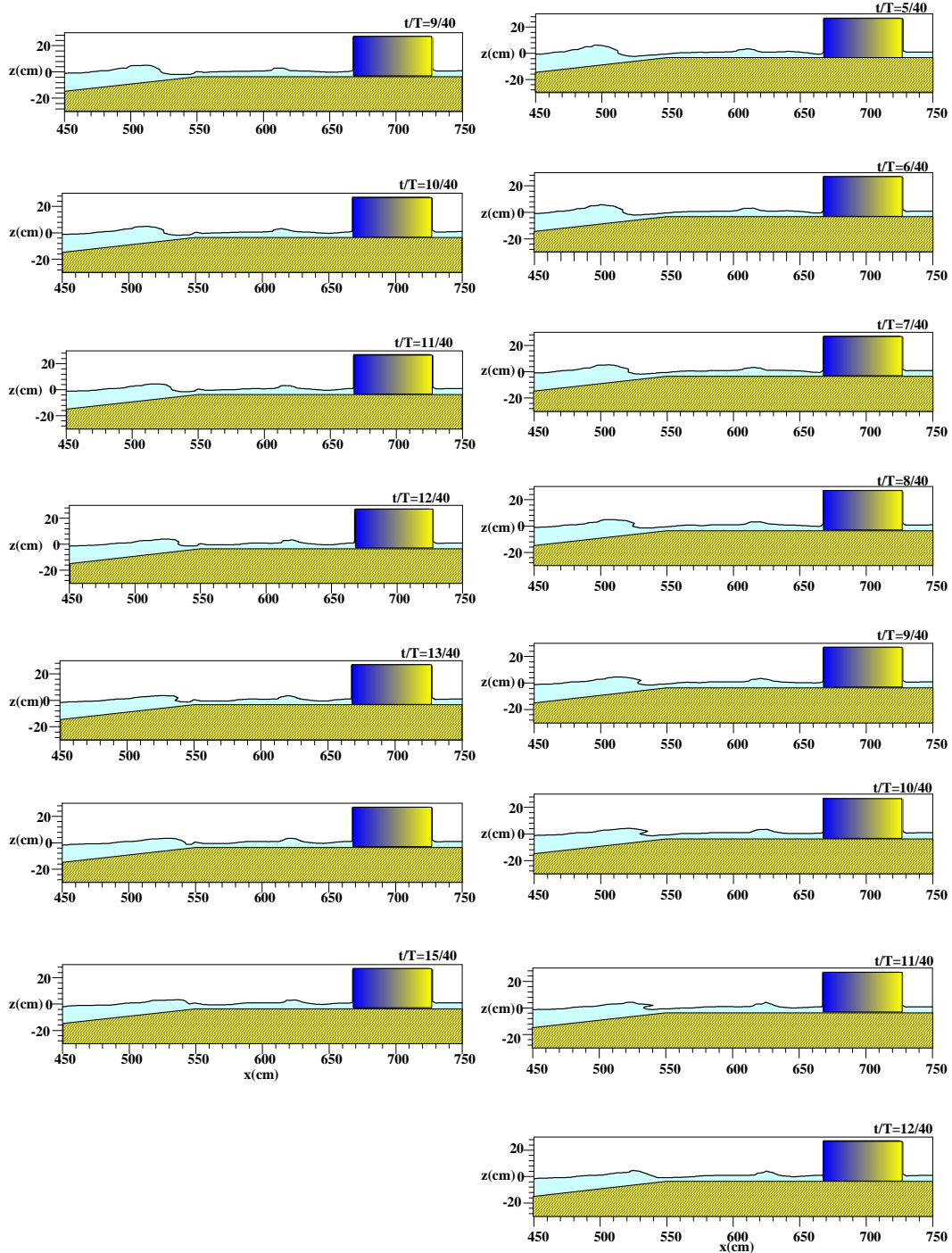
( $H=10.0$  cm,  $d=4$  cm).



(a)  $H=9.0\text{cm}$ ,  $t/T=9/40 \sim 15/40$

(b)  $H=10.0\text{cm}$ ,  $t/T=5/40 \sim 11/40$

Fig. 4.13 Free surface evolution in case of not installed circular column.



(a)  $H=9.0\text{cm}$ ,  $t/T=9/40\sim 15/40$

(b)  $H=10.0\text{cm}$ ,  $t/T=5/40\sim 12/40$

Fig. 4.14 Free surface evolution in case of installed circular column.

### 2.2.3 구조물의 위치변화에 따른 비선형파력의 특성

Fig. 4.15는 Fig. 4.4에서 정의된 바와 같이 경사면에서 일정수심역으로 변하는 지점, 즉 사면분기점에서 구조물까지의 거리  $S$ 를 10cm에서 190cm까지 20cm의 간격으로 구조물의 위치를 변화시키면서 파력의 변화를 나타낸 것이다. 파고는 구조물에 작용하는 파력이 증가에서 감소로 바뀌는  $H=9\text{cm}$ 와  $H=10\text{cm}$ 의 경우에 대하여 나타내었다.

입사파랑의 파고가 작아 경사면의 영향을 거의 받지 않는다면 일정수심영역에서 구조물에 작용하는 파력은 위치에 상관없이 일정하게 나타날 것으로 판단된다. 그러나, 경사면에서 쇄파가 발생하는 경우에는 파랑에너지가 감쇠되어 구조물의 위치에 따라 파력의 변화가 다르게 나타날 것이다. 이로부터 쇄파가 발생함에 따라 사면분기점을 기준으로 거리가 멀어지면서 파력이 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히, 쇄파의 발생위치에 따라 파력이 감소하는 기울기에서 차이가 나타나며,  $S=70\text{cm}$ 를 기점으로 하여  $H=10\text{cm}$ 에서의 파력이  $H=9\text{cm}$ 의 경우보다 작게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 쇄파의 발생위치는 Table 4.2에서 나타낸 바와 같이  $H=9\text{cm}$ 의 경우에 쇄파의 발생위치는  $x \approx 525\text{cm}$ 으로, 분기점  $x=550\text{cm}$ 에서 -25cm떨어진 거리에서 쇄파가 발생하며,  $H=10\text{cm}$ 는  $H=9\text{cm}$ 의 경우보다 먼저 쇄파가 발생하고, 그 위치는  $x \approx 510\text{cm}$ 으로, 분기점에서 -40cm 떨어져 있다.

$H=9\text{cm}$  및  $H=10\text{cm}$ 의 경우 모두 경사면상에서 쇄파가 발생하여 쇄파후에 경사면을 지나면서 파랑에너지가 감쇠되며, 감쇠기울기는 쇄파의 발생위치에 따라 상이하다. 두 경우 모두  $S=10\text{cm}$  및  $30\text{cm}$ 에서 파력의 변화정도가 가장 크게 나타나며, 쇄파위치에 근접할수록 구조물에 작용하는 파력의 변화정도가 크고, 일정거리의 이후부터는 쇄파의 영향이 작아져 구조물에 작용하는 파력의 변화가 작다.

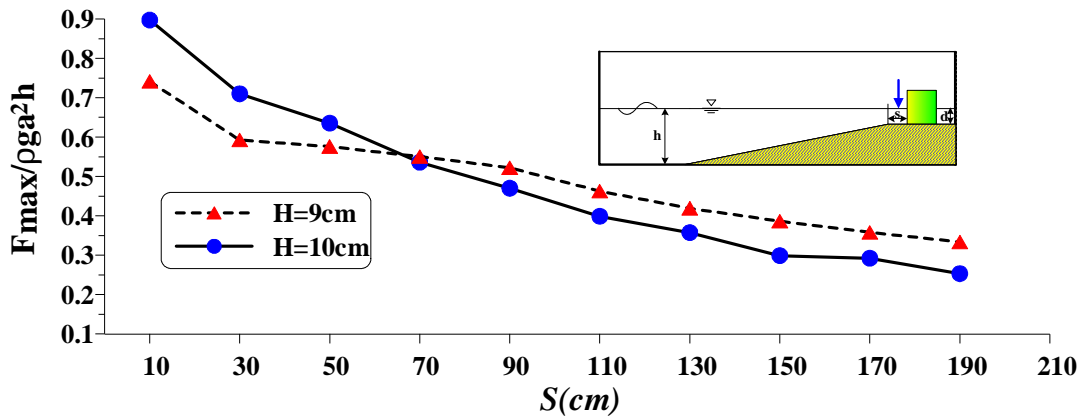


Fig. 4.15 Non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular column according to the variation of installed position of structure( $d=4\text{cm}$ ).

## 2.3 수치해석결과( $d=6\text{cm}$ )

### 2.3.1 파고변화에 따른 비선형파력과 비선형파랑변형의 특성

Fig. 4.16은 Fig. 4.4에 정의된 일정수심역의 깊이  $d$ 가 6cm인 경우에 입사파고를 8cm에서 12cm까지 변화시키면서 구조물에 작용하는 비선형파력의 특성을 나타낸 결과로, 구조물은 사면분기점  $S=0\text{cm}$ ,  $x=530\text{cm}$ 에서 200cm떨어진 곳에 위치하고 있다. 결과를 살펴보면 Fig. 4.5와 동일하게 파고의 증가에 따라 파력이 점차적으로 증가하여  $H=11\text{cm}$ 에서 최대파력이 작용하고,  $H=12\text{cm}$ 에서 파력이 감소하는 경향은 나타낸다. 이러한 경향은 경사면상에서 쇄파의 발생위치와 상관관계가 있다. 여기서, 전술한 일정수심영역의 깊이  $d$ 가 4cm인 경우를 포함하여 쇄파위치와 시점을 중심으로 구조물에 작용하는 파력의 변화특성을 논의한다. 후술하는 Fig. 4.17~Fig. 4.27의  $H=11\text{cm}$  및  $H=12\text{cm}$ 의 경우에 구조물의 유무에 따른 파랑변형의 특성을 요약하여 Table 4.3에 나타내었다.

Fig. 4.17 및 Fig. 4.18은 파고  $H=11\text{cm}$ 인 경우에 구조물의 유무에 따른 전계산영역에서 파랑변화를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 4.19는 일부 영역인  $x=450\sim 750\text{cm}$ 의 범위에서 파형변화를 상세하게 나타낸 것으로, Fig. 4.19(a)는 구조물이 설치된 경우이고, Fig. 4.19(b)는

설치되지 않은 경우이다. Fig. 4.19(a)의 구조물이 존재하는 경우에 쇄파의 시작은  $t/T=11/40$ ,  $x \approx 525\text{cm}$ 에서 발생하며,  $t/T=15/40$ ,  $x \approx 545\text{cm}$ 에서 쇄파가 종료된다. 쇄파는 사면의 끝단인 사면분기점  $S=0\text{cm}$ ,  $x=530\text{cm}$ 을 지나서 쇄파가 종료되므로 후술하는 Fig. 4.25에 나타난 바와 같이 구조물에 작용하는 파력의 감소기울기가 작게 나타난다. 이는 쇄파가 경사면에서 발생한 후에 경사면을 지나면서 파랑에너지가 소실되는 영향을 받지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 4.20 및 Fig. 4.21은  $H=12\text{cm}$ 의 경우에 파고분포를 각각 구조물의 유무에 따라 전 계산영역에 대해 나타난 것으로, Fig. 4.22는 그의 일부 영역  $x=450\sim 750\text{cm}$ 에 대해 상세히 나타난 것이다.

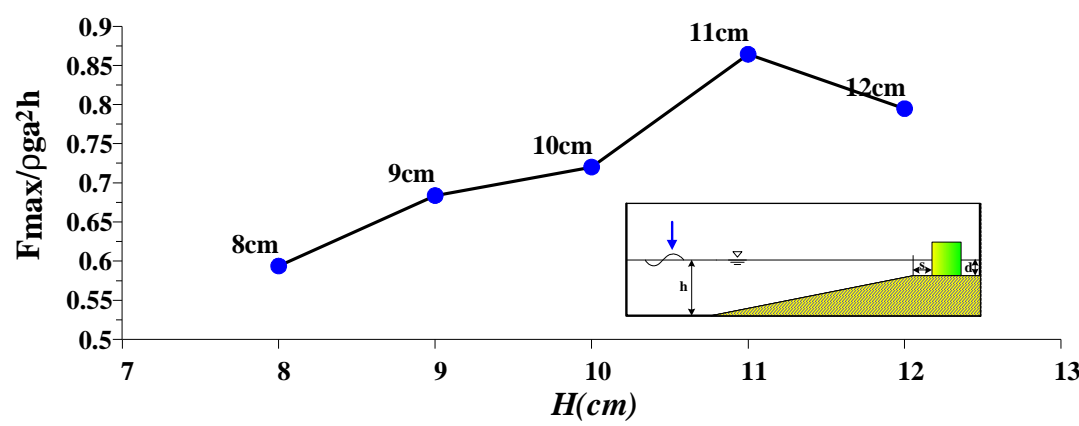


Fig. 4.16 The variation of non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular column according to the change of wave height( $d=6\text{cm}$ ).

Table 4.3 Summary of wave breaking point and duration time in cases of  $H=11\text{cm}$  and  $12\text{cm}$ .

Wave height $H(\text{cm})$	Structure	Initiation point of wave breaking $x(\text{cm})$	Termination point of wave breaking $x(\text{cm})$	Duration time $t/T$	End of slope $x(\text{cm})$
11	not installed	525	535	8/40~12/40	530
	installed	525	545	11/40~15/40	
12	not installed	480	515	16/40~23/40	
	installed	480	515	16/40~23/40	

Fig. 4.22에서 보는 바와 같이 각각의 경우에 있어서 쇄파의 시작은  $t/T=16/40$ ,  $x \approx 480\text{cm}$ 로 쇄파는 거의 동일하게 발생되며, 구조물의 유무와 상관없이 쇄파는  $t/T=23/40$ ,  $x \approx 515\text{cm}$ 에서 종료된다.  $H=12\text{cm}$ 의 경우는  $H=11\text{cm}$ 의 경우에 비해 파고가 커짐에 따라 쇄파가 먼저 발생되며, 쇄파파형도 사면분기점  $S=0\text{cm}$ ,  $x=530\text{cm}$ 의 이전에서 나타난다. Fig. 4.23 및 Fig. 4.24는 구조물의 영향으로 인한 쇄파파형의 변화를 비교하기 위하여 구조물의 설치 유무에 따라  $H=11\text{cm}$ ,  $H=12\text{cm}$ 의 경우에 파형변화를 나타낸 것이다. Fig. 4.23의 구조물이 없는 경우로  $H=11\text{cm}$ 에 있어서는  $t/T=8/40 \sim 12/40$ 에 걸쳐 쇄파파형이 나타나고, 발생지점은  $x \approx 525 \sim 535\text{cm}$ 이다.  $H=12\text{cm}$ 에 있어서는 쇄파파형이  $t/T=16/40 \sim 23/40$ 에서 나타나고, 쇄파파형이 지속되는 시간도  $H=11\text{cm}$ 에 비해 길게 나타나며, 쇄파파형도 크게 나타난다. 쇄파가 나타나는 지점도 경사면의 영역인  $x \approx 480 \sim 515\text{cm}$ 의 범위에서 발생한다.



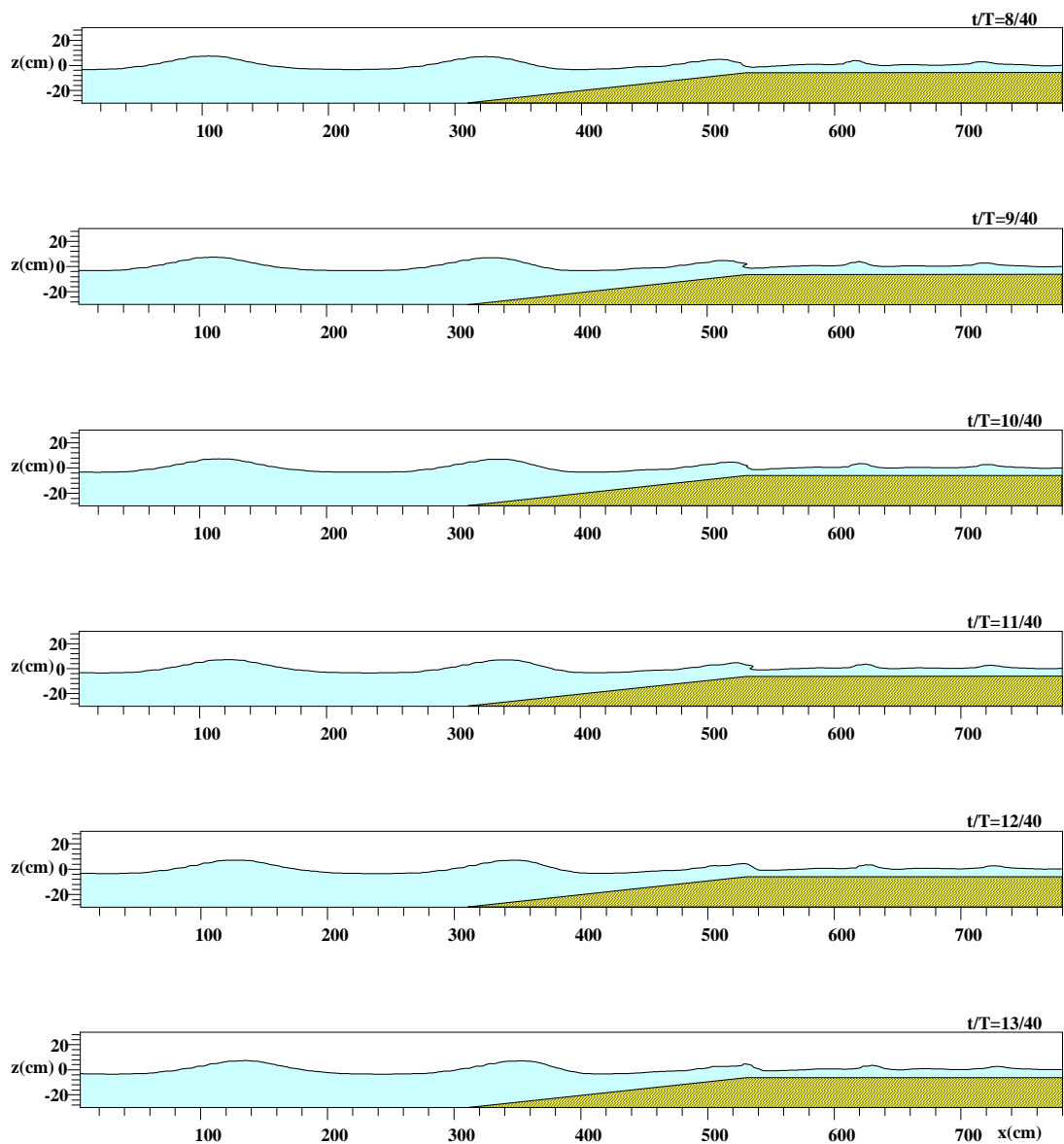


Fig. 4.17 Free surface evolution in case of installed circular column

( $t/T=8/40 \sim 13/40$ ,  $H=11.0\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ).

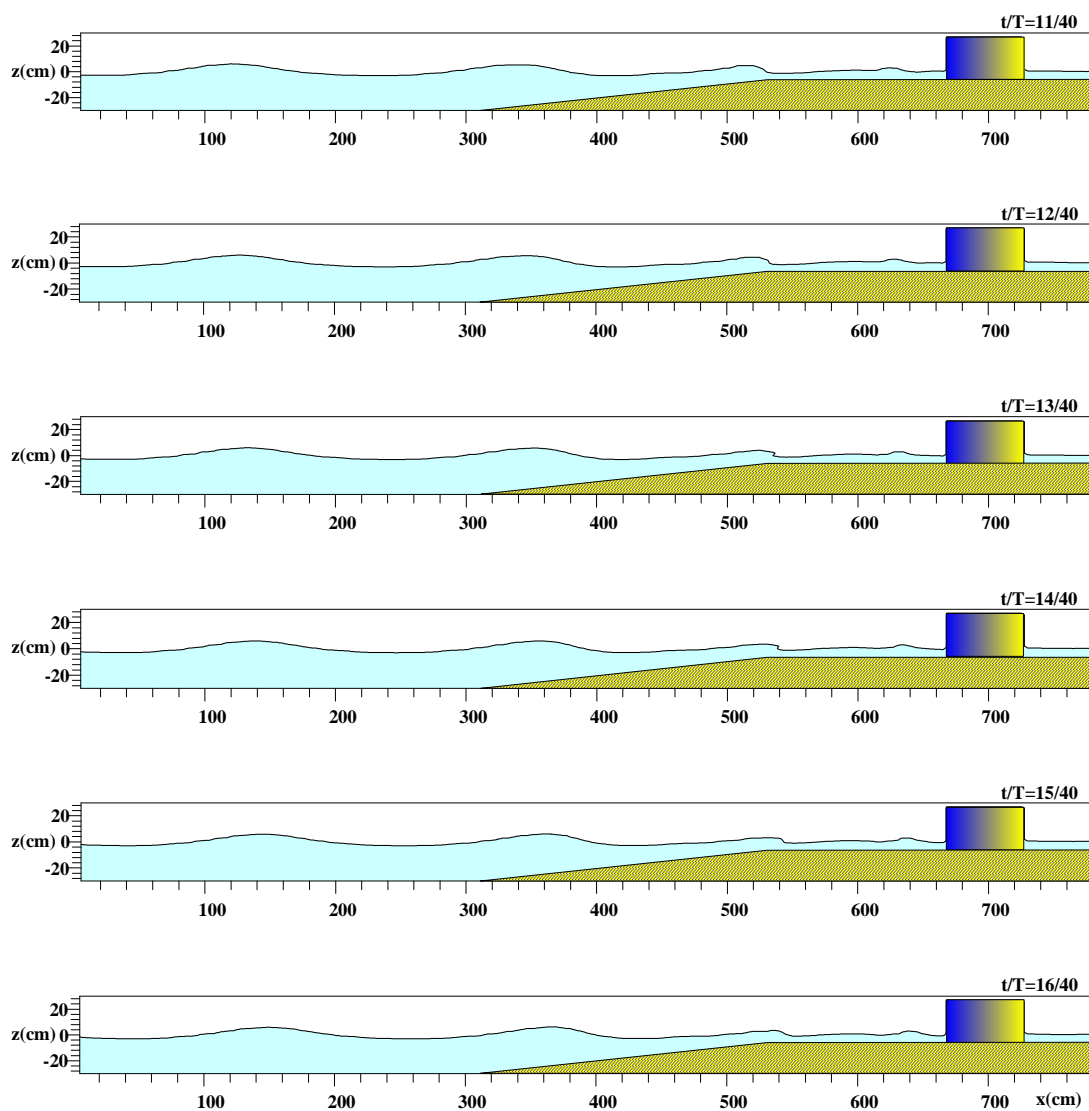


Fig. 4.18 Free surface evolution in case of installed circular column

( $t/T=11/40 \sim 16/40$ ,  $H=11.0\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ).



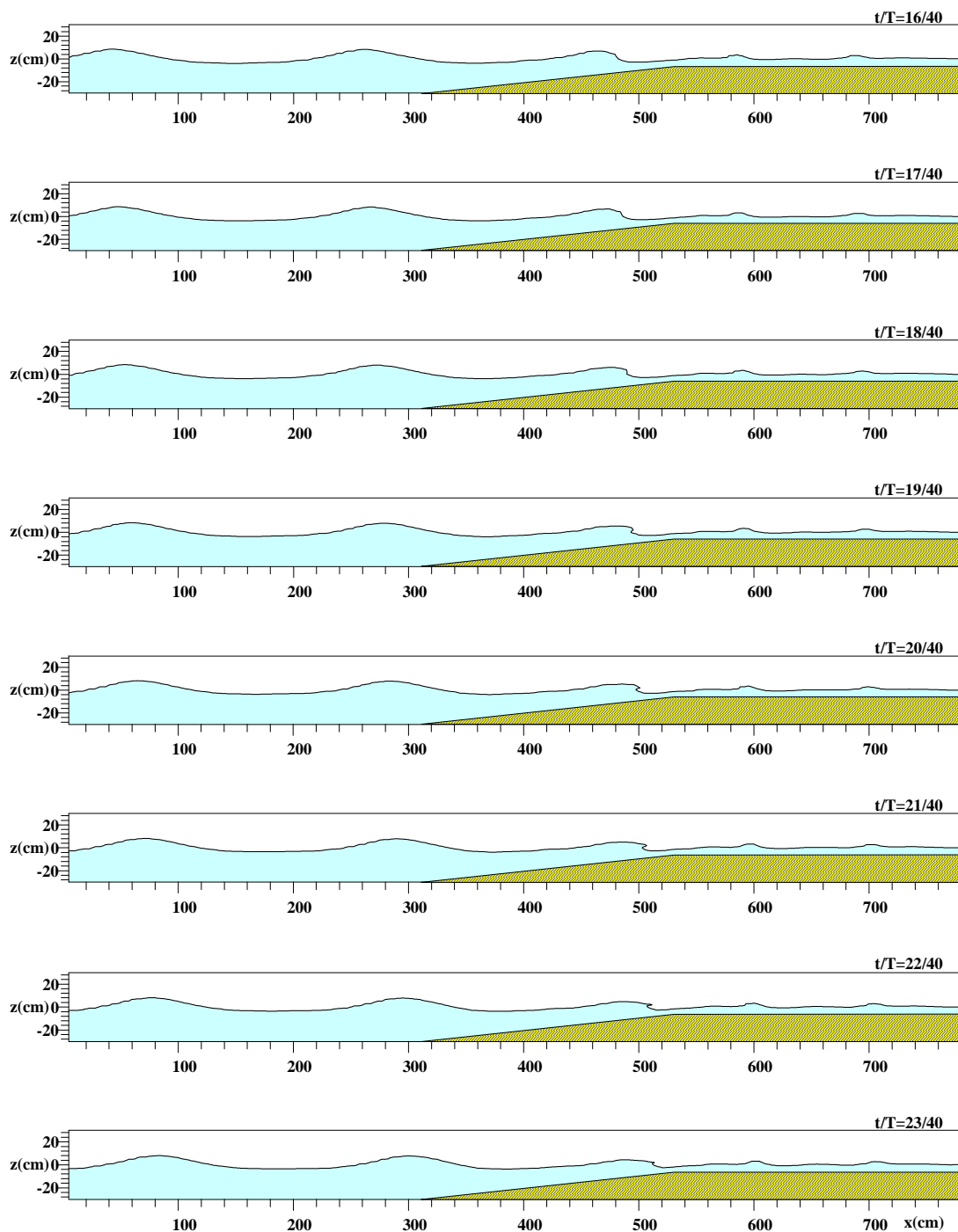


Fig. 4.20 Free surface evolution in case of installed circular column.

( $t/T=16/40 \sim 23/40$ ,  $H=12.0\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ).

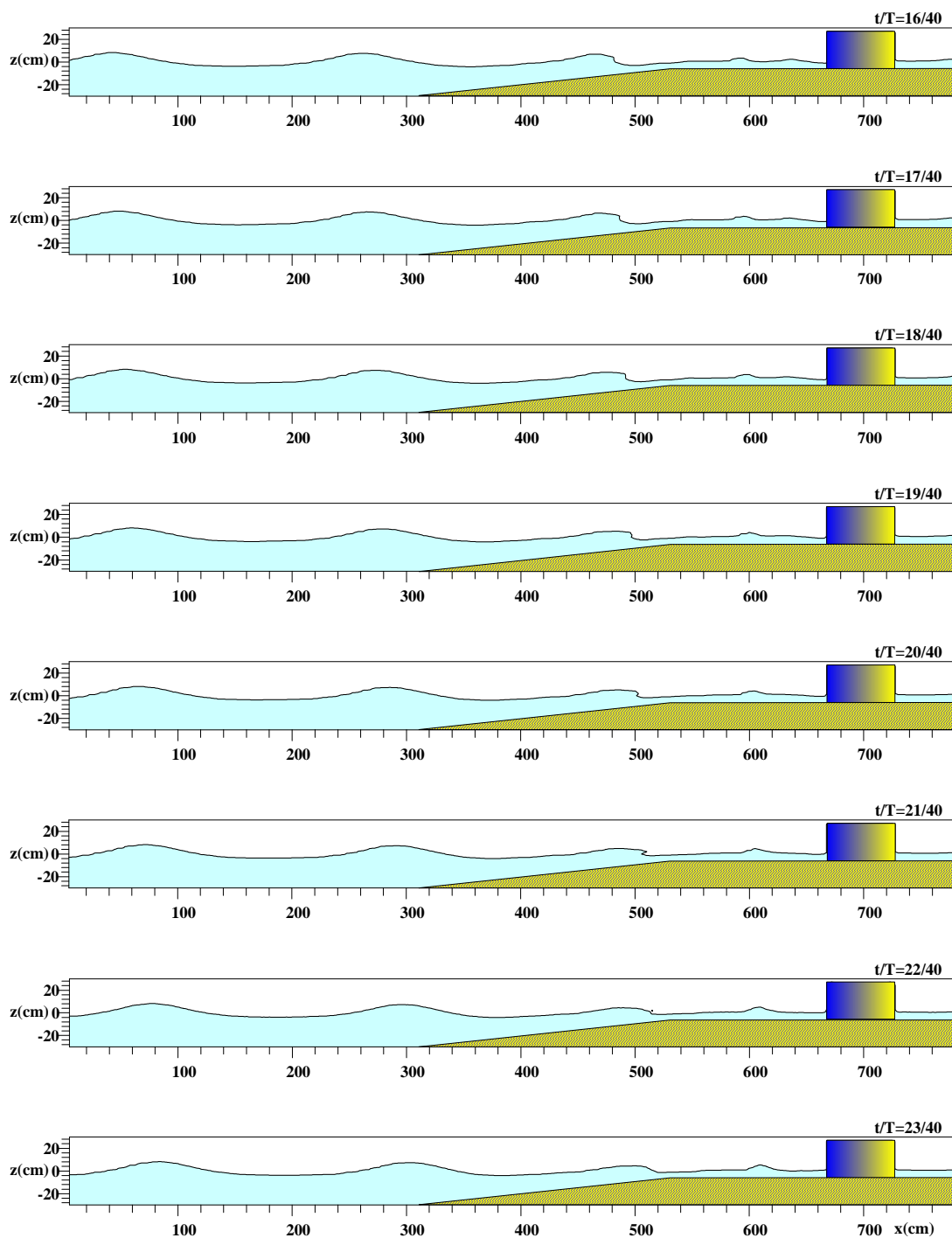


Fig. 4.21 Free surface evolution in case of installed circular columnn

( $t/T=16/40\sim23/40$ ,  $H=12.0\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ).

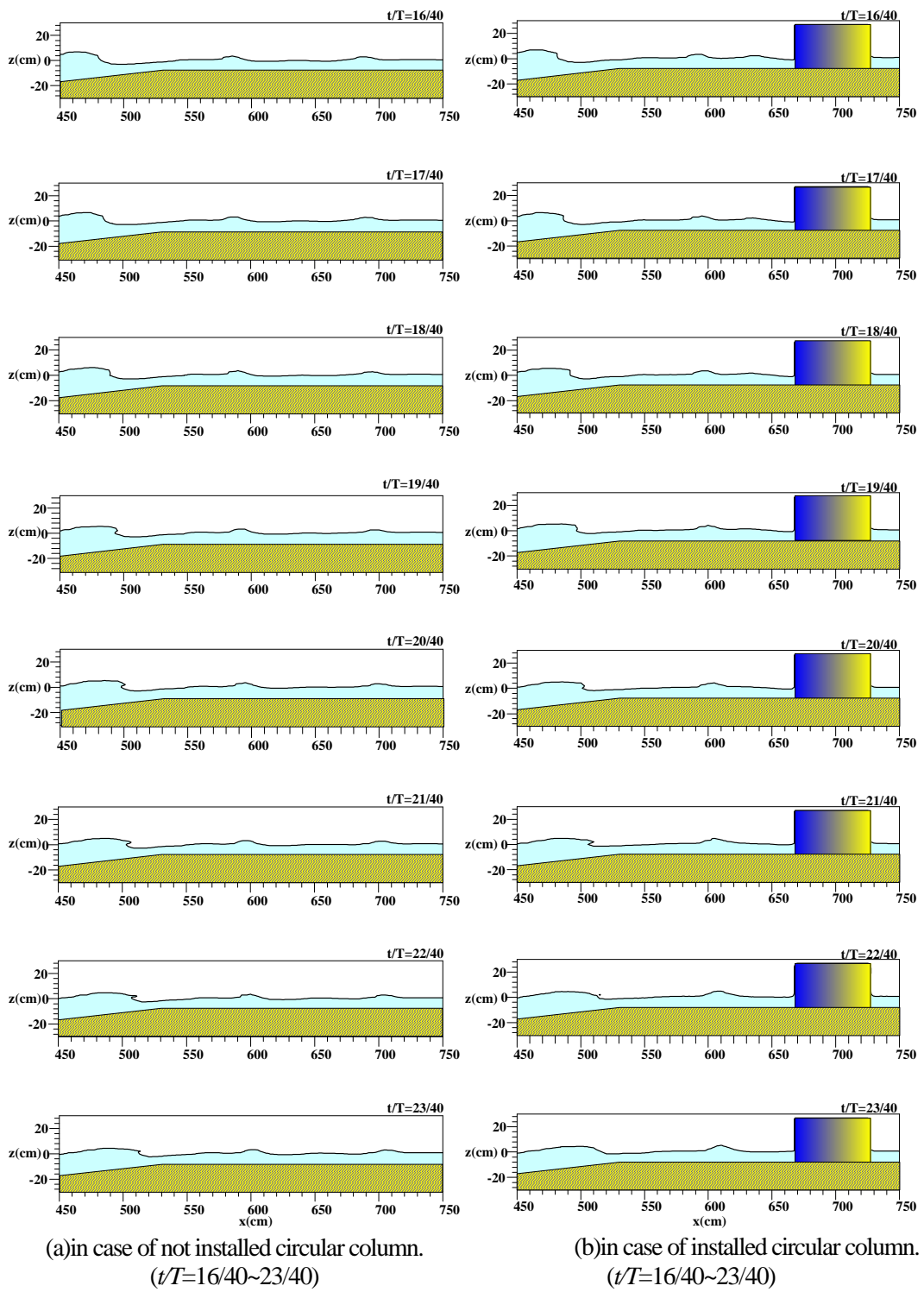
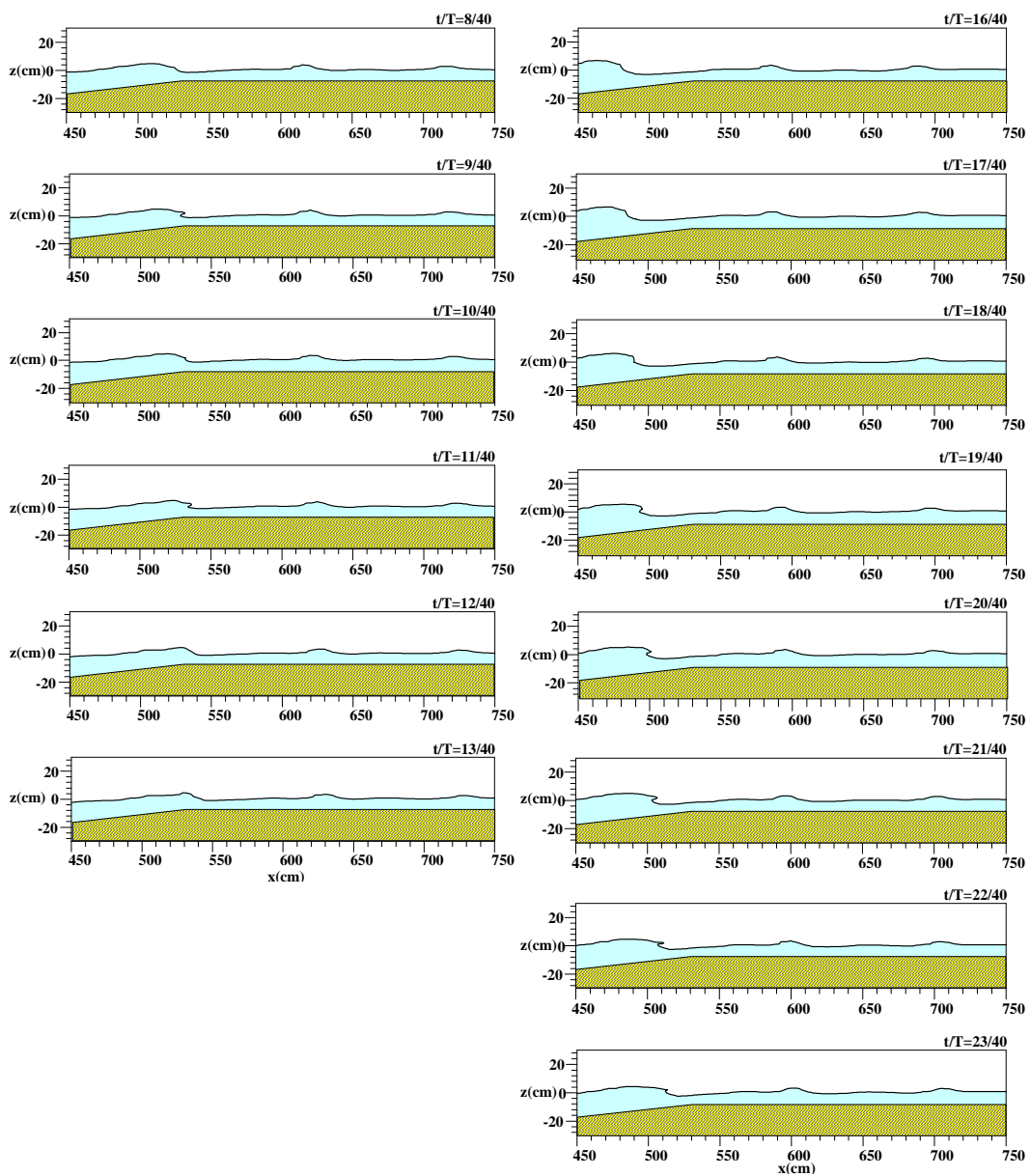


Fig. 4.22 Free surface evolution in region  $x = 450\text{cm} \sim 750\text{cm}$ .

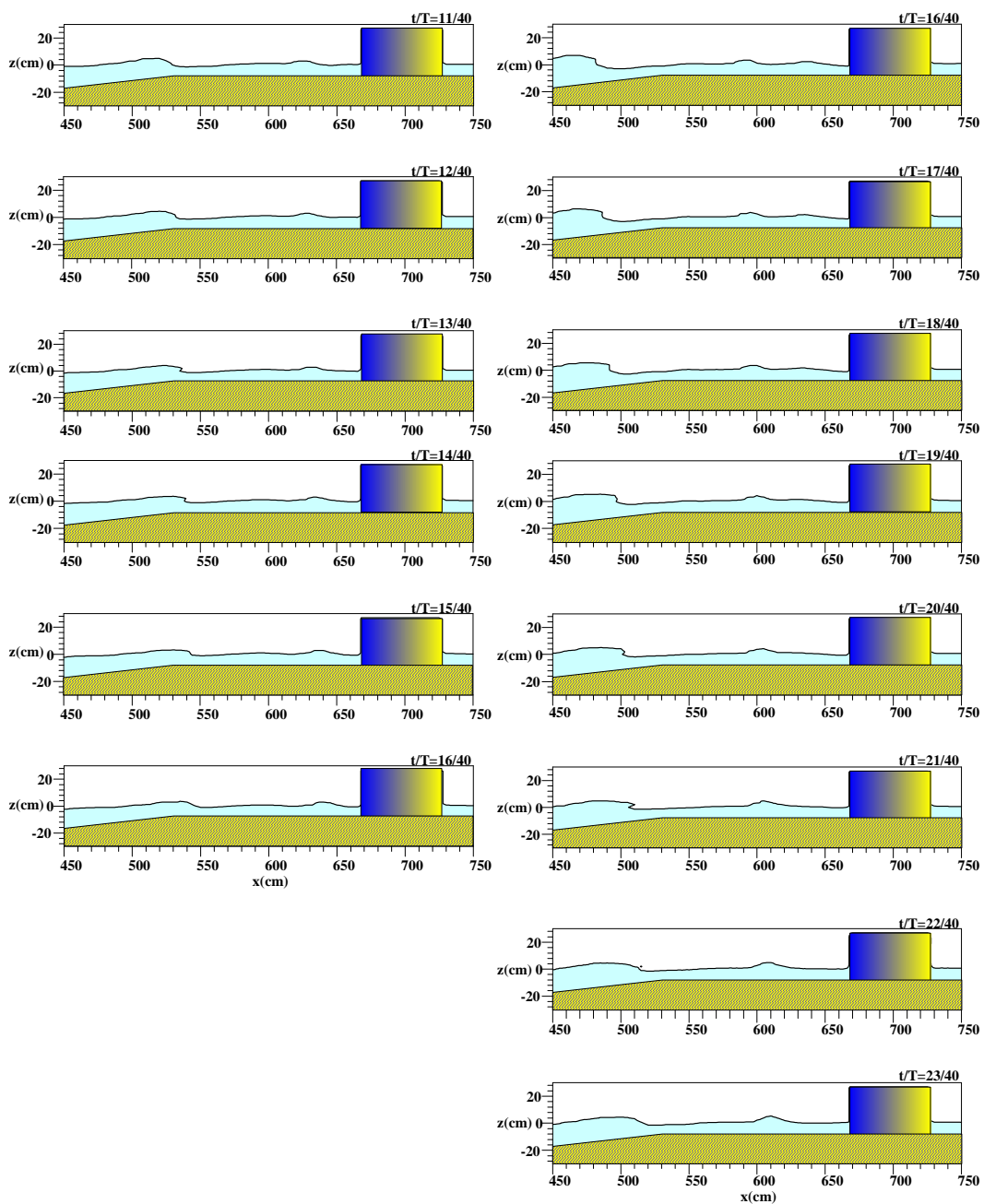
( $H=12.0\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ )



(a)  $H=11.0\text{cm}$ ,  $t/T=8/40 \sim 13/40$

(b)  $H=12.0\text{cm}$ ,  $t/T=16/40 \sim 23/40$

Fig. 4.23 Free surface evolution in case of not installed circular column.



(a)  $H=11.0\text{cm}$ ,  $t/T=11/40 \sim 16/40$

(b)  $H=12.0\text{cm}$ ,  $t/T=16/40 \sim 23/40$

Fig. 4.24 Free surface evolution in case of installed circular column.



### 2.3.2 구조물의 위치변화에 따른 비선형파력의 특성

Fig. 4.25는 Fig. 4.4에서 정의된 계산영역에 사면분기점  $S=0\text{cm}$ ,  $x=530\text{cm}$ 에서  $S=10\sim 210\text{cm}$ 의 범위에서  $20\text{cm}$ 의 간격으로 구조물의 위치를 변화시키면서 파력의 변화를 나타낸 것으로, 파력이 증가에서 감소로 바뀌는 파고  $H=11\text{cm}$ 와  $H=12\text{cm}$ 인 경우이다. 결과를 살펴보면  $H=11\text{cm}$ 의 구조물이 없는 경우에 쇄파파형의 발생위치가  $x \approx 525\text{cm}$ 로, 구조물의 위치가  $S=10\text{cm}$ 의 경우는 쇄파의 발생위치에 근접하기 때문에 쇄파시에 구조물에 작용하는 파력에 가깝다.  $H=11\text{cm}$ 의 경우는 쇄파지점이 사면분기점을 지나서 형성됨에 따라 경사면에서 쇄파가 발생한 경우에 비해 사면을 지나면서 소실되는 파랑에너지가 작기 때문에 파력에서 전체적인 변화기울기가  $H=12\text{cm}$ 의 경우에 비해 작게 나타나지만, 쇄파지점에 가까운 곳에 구조물이 위치한  $H=10\text{cm}$ 의 경우에는 쇄파후에 구조물에 작용하는 파력보다 약 1.4배 정도로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 쇄파발생후에 감소한 파력은  $S=70\text{cm}$ 에서 다소 증가하지만, 사면분기점에서 멀어질수록 점차적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

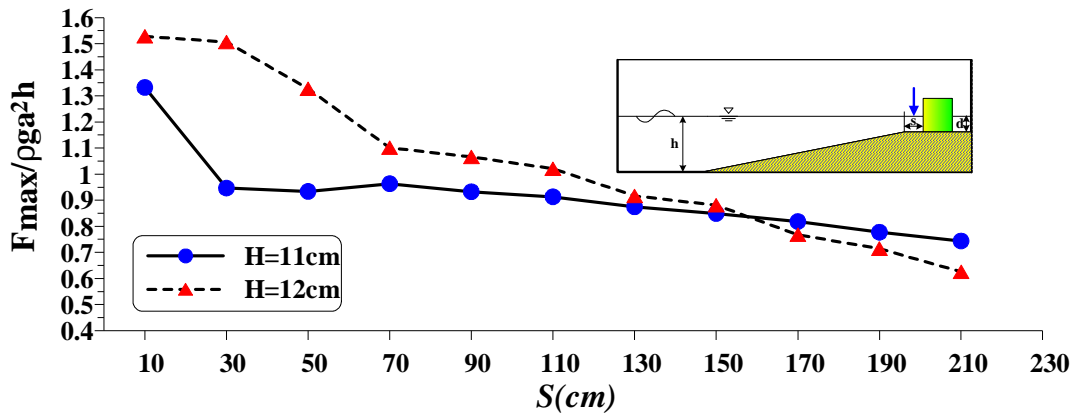
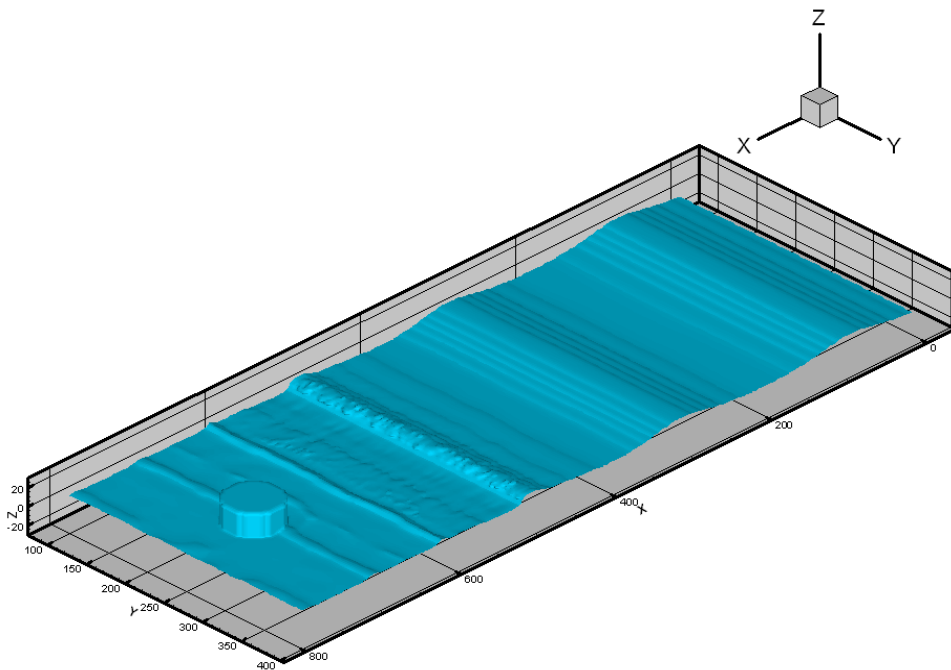


Fig. 4.25 Non-dimensional maximum wave forces acting on vertical circular column according to the variation of installed position of structure( $d=6\text{cm}$ ).

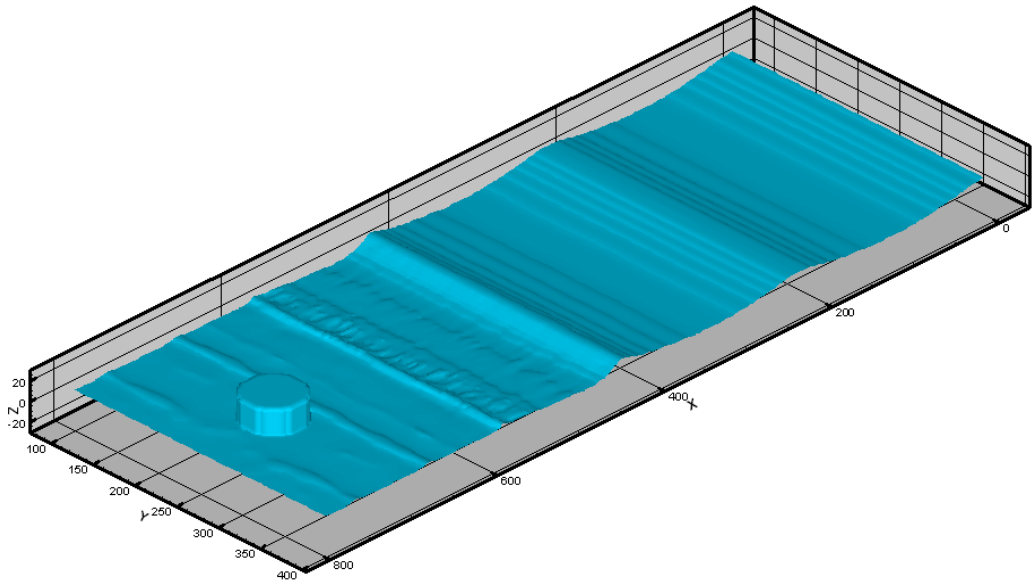
$H=12\text{cm}$ 인 경우에 쇄파가 나타나는 영역은  $x \approx 480 \sim 515\text{cm}$ 로, 구조물의 유무와 상관 없이 쇄파는 사면분기점의  $S=0$ ,  $x=530\text{cm}$ 의 이전의 영역에서 발생한다. 따라서,  $H=10\text{cm}$ 의 경우는  $H=11\text{cm}$ 의 경우와는 달리 쇄파후의 파력을 나타낸다. 구조물에 작용하는 파력의 감소기울기는  $H=11\text{cm}$ 의 경우에 비해 크게 나타나며, 이는 경사면상에서 쇄파가 발생함에 따라 사면을 진행하면서 파랑에너지가 소실되어 구조물에 작용하는 파력의 감소기울기가  $H=11\text{cm}$ 의 경우보다 크기 때문으로 판단된다. 따라서, 이러한 기울기의 차이로 인하여  $S=170\text{cm}$ 의 이후에는  $H=11\text{cm}$ 의 경우보다 파력이 작게 나타나는 경향을 나타낸다.

### 2.3.3.3 차원표면파형의 변화

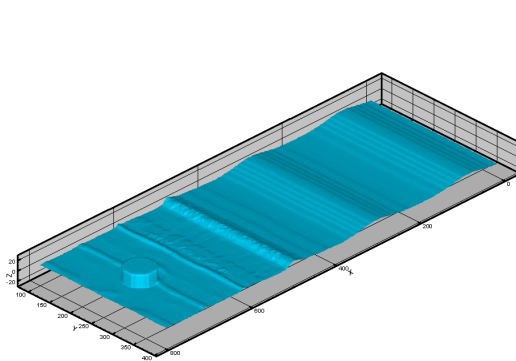
Fig. 4.26은 2차원으로 파랑변형을 나타낸 Fig. 4.11의  $H=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ,  $S=180\text{cm}$ 인 경우에 대해 전파동장을 3차원으로 나타낸 것으로, 한주기의 파랑에 대해  $t/T=2/40$ 간격으로 표시하였다. 대략  $t/T=4/40$ 에서부터 쇄파가 발생하기 시작하여 쇄파된 파가 구조물에 도달하고 구조물의 영향으로 인하여 회절산란파가 발생하는 현상을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.



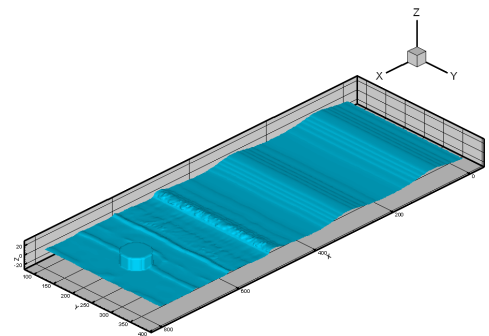
$$t/T=4/40$$



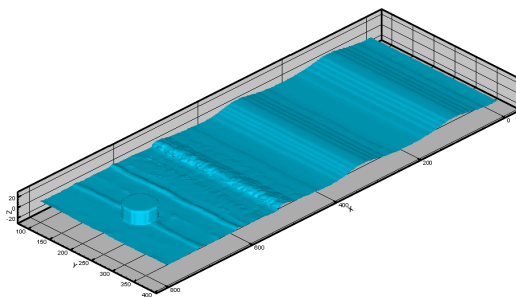
$t/T=30/40$



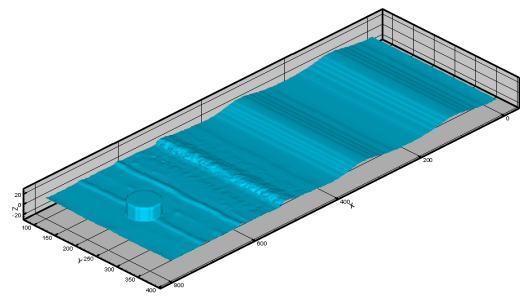
$t/T=2/40$



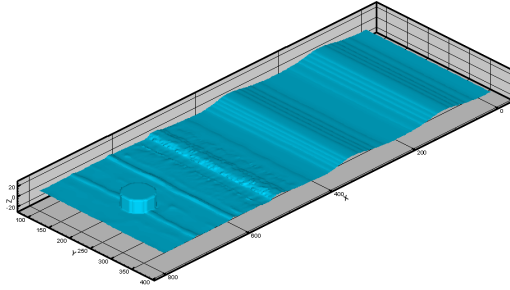
$t/T=4/40$



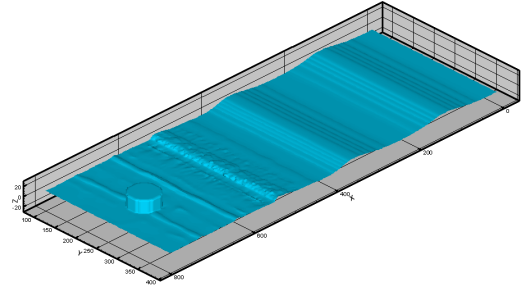
$t/T=6/40$



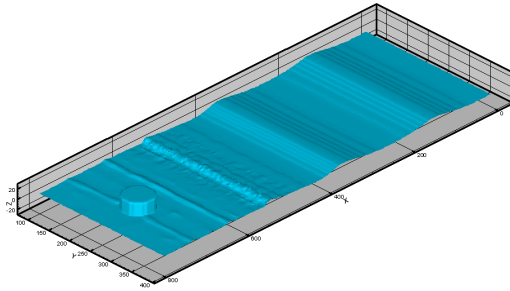
$t/T=8/40$



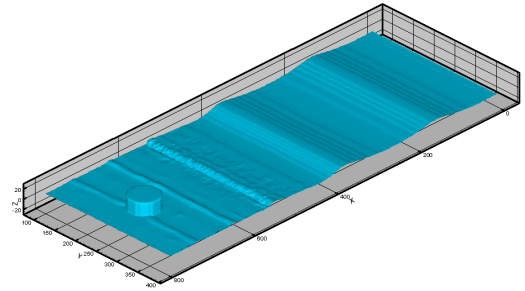
$t/T=10/40$



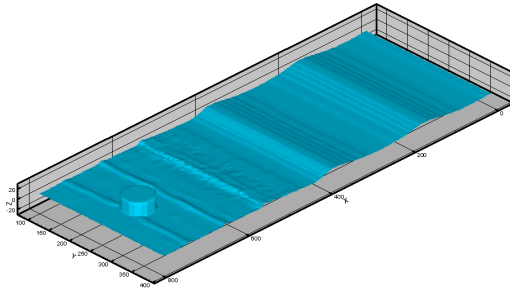
$t/T=12/40$



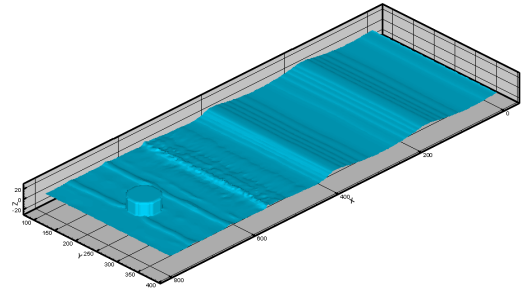
$t/T=14/40$



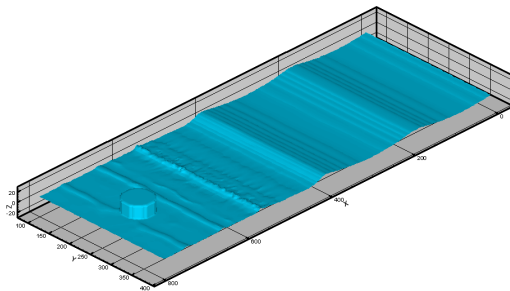
$t/T=16/40$



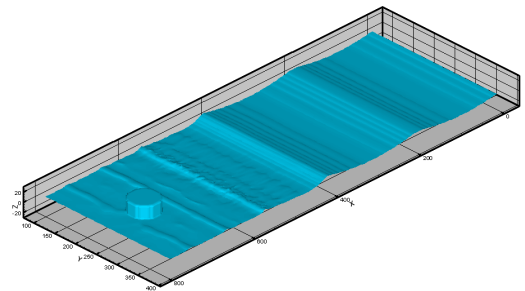
$t/T=18/40$



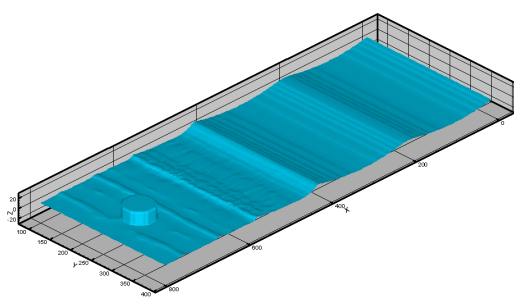
$t/T=20/40$



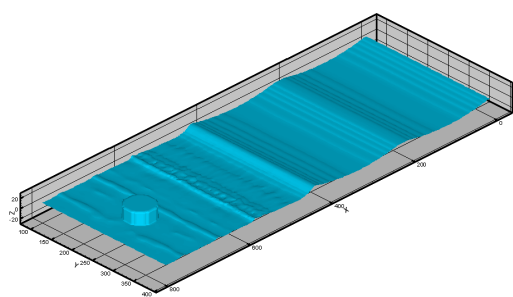
$t/T=22/40$



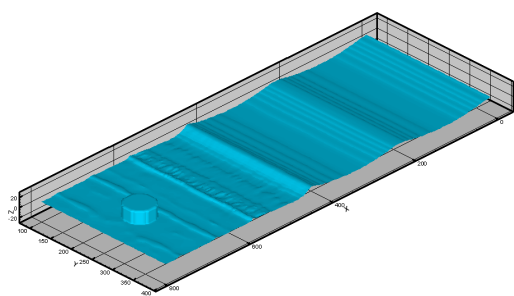
$t/T=24/40$



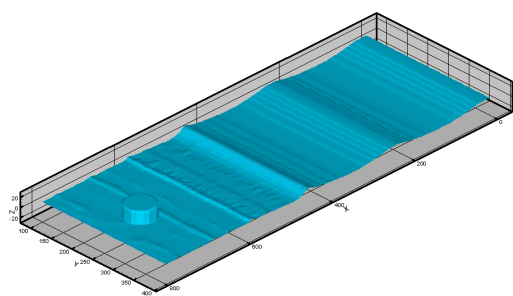
$t/T=26/40$



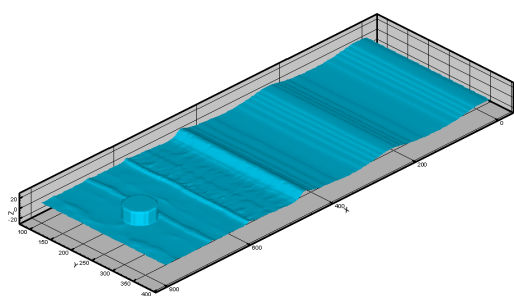
$t/T=28/40$



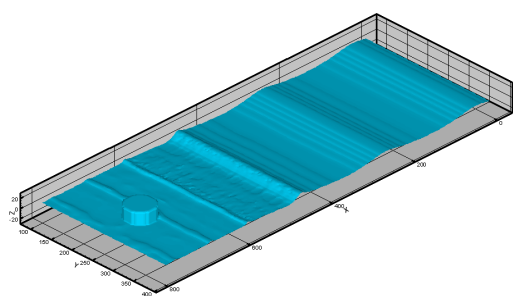
$t/T=30/40$



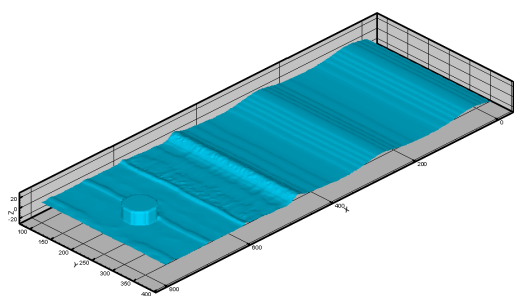
$t/T=32/40$



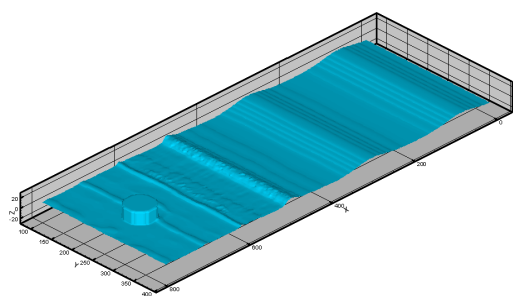
$t/T=34/40$



$t/T=36/40$



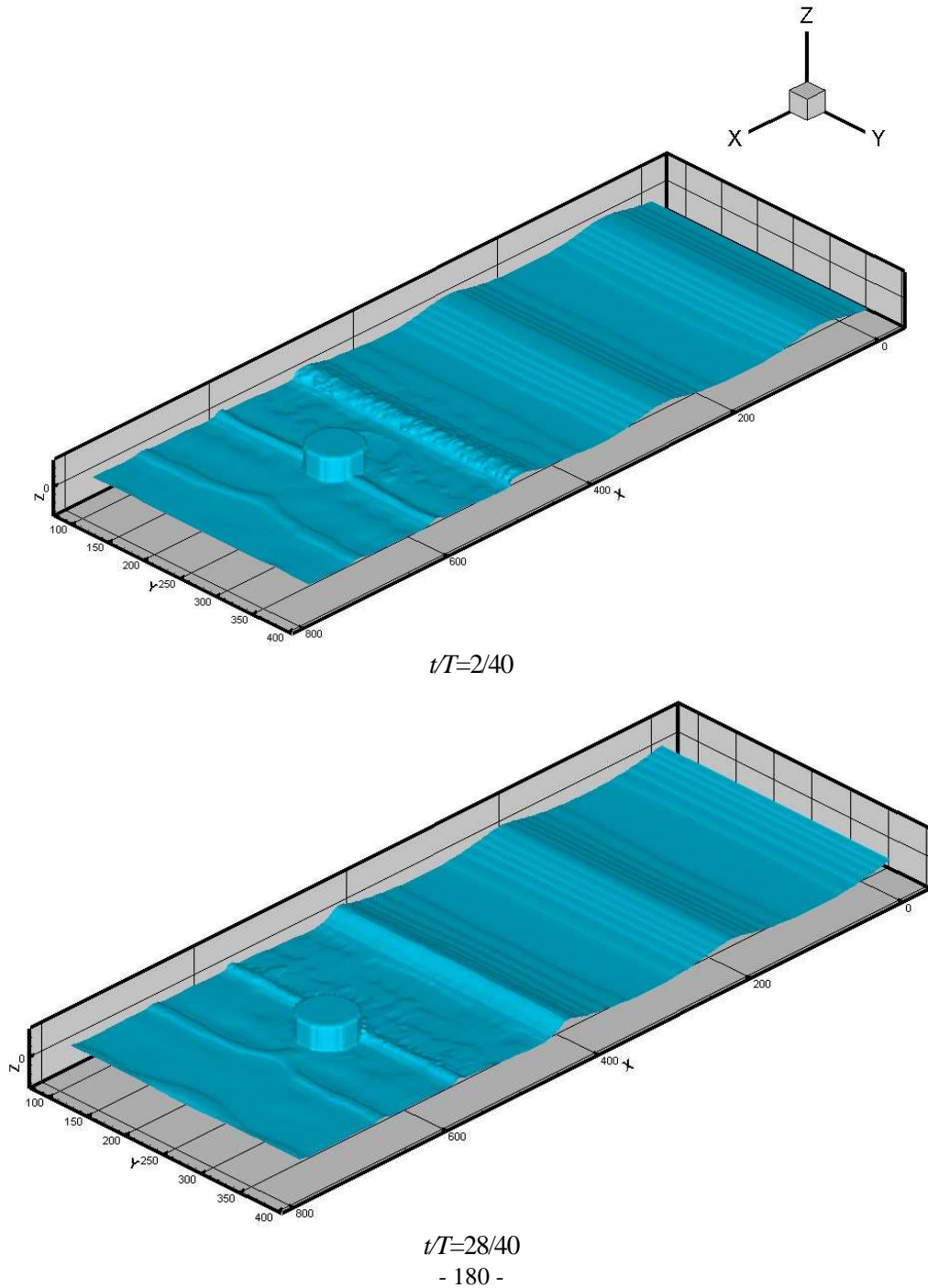
$t/T=38/40$



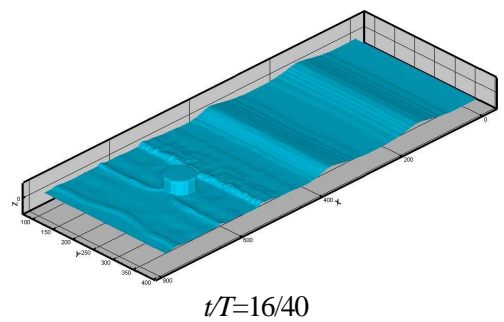
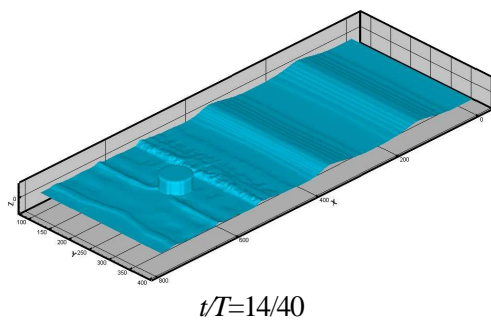
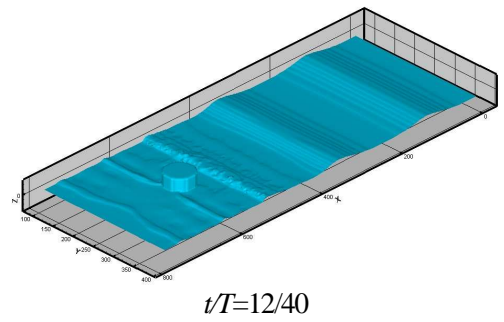
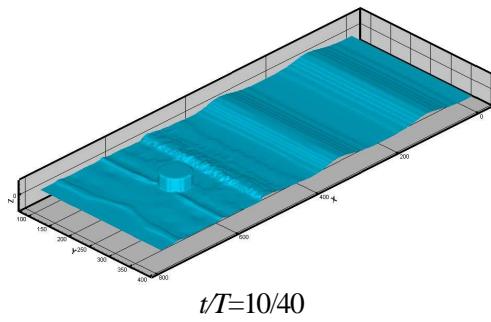
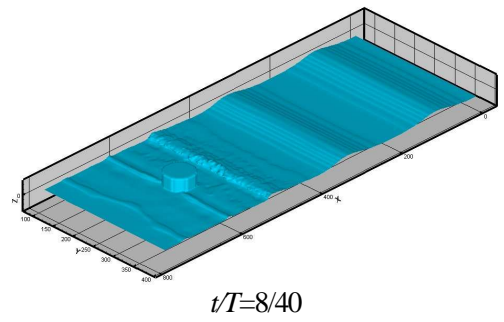
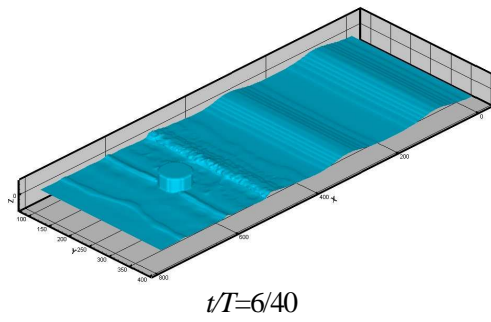
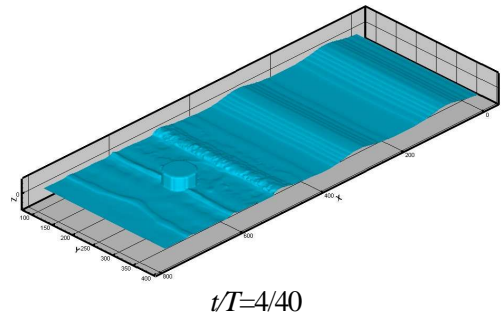
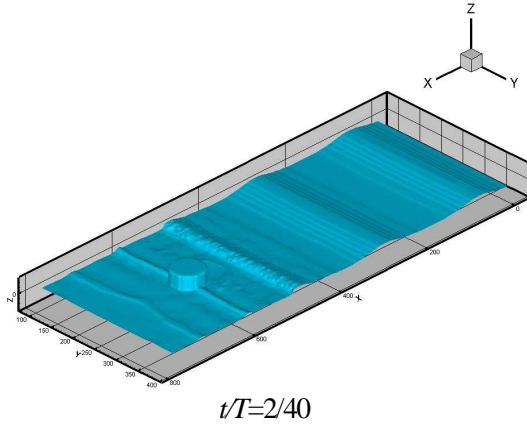
$t/T=40/40$

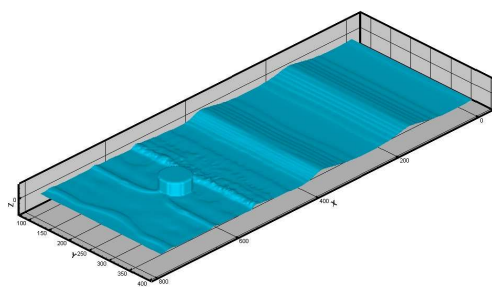
Fig. 4.26 Surface plot of water surface profiles( $H=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ,  $S=180\text{cm}$ ).

Fig. 4.27은  $H=11\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ,  $S=30\text{cm}$  인 경우로 Fig. 4.26에 비해 일정수심역의 수심이 깊어지고 파고가 커짐에 따라 구조물에 의한 반사파의 영향이 크게 나타나며, 구조물이 쇄파지점에 근접하게 위치됨에 따라 구조물의 전면에서 쇄파파형의 변화가 구조물의 측면에 비해 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

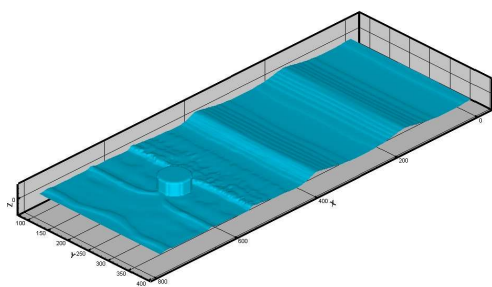




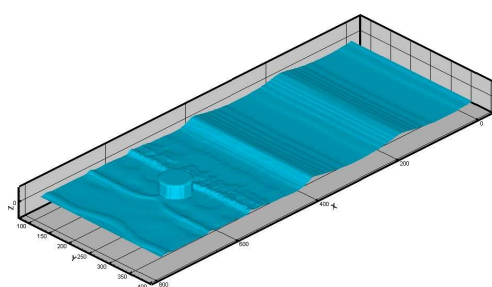




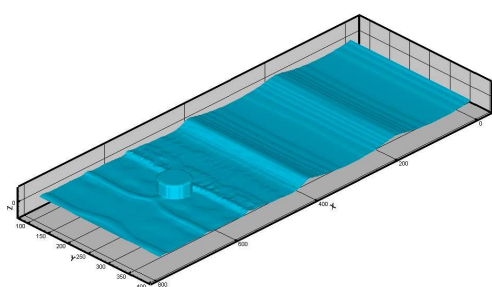
$t/T=18/40$



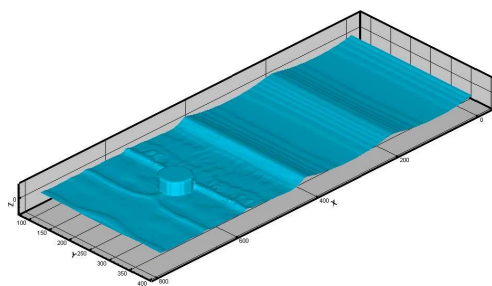
$t/T=20/40$



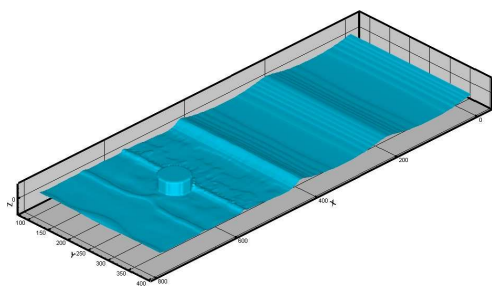
$t/T=22/40$



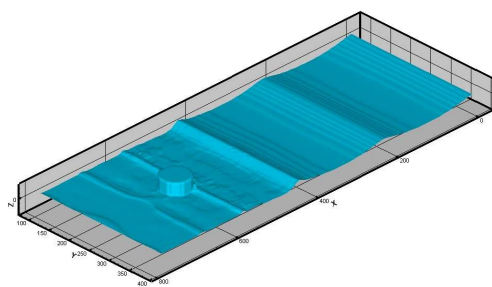
$t/T=24/40$



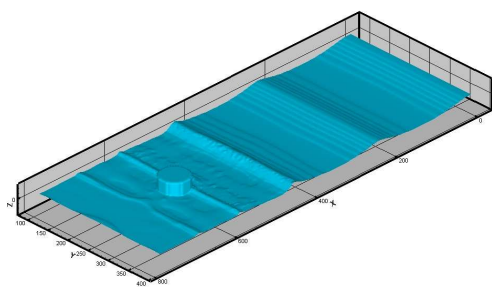
$t/T=26/40$



$t/T=28/40$

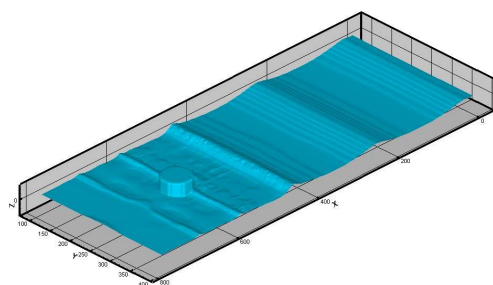


$t/T=30/40$

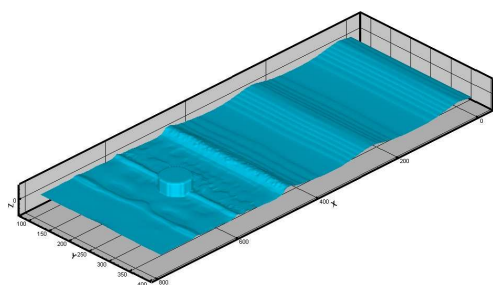


$t/T=32/40$

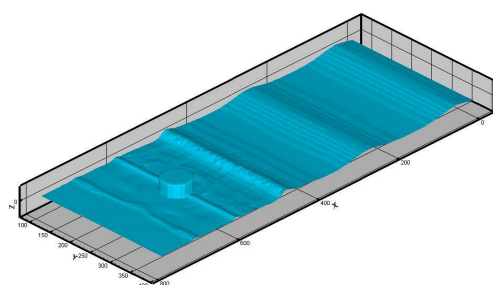




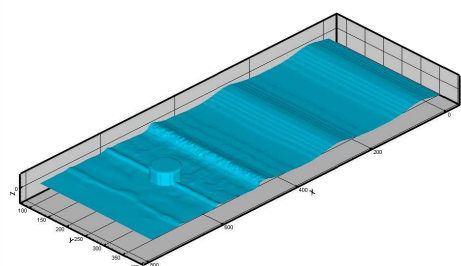
$t/T=34/40$



$t/T=36/40$



$t/T=38/40$



$t/T=40/40$

Fig. 4.27 Surface plot of water surface profiles( $H=11\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ,  $S=30\text{cm}$ ).

### 3. 결론

본 장에서는 Full-nonlinear 해석법(3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 자유수면의 추적에 3차원 VOF법을 접합한 해석법)을 적용하여 해저면을 경사면과 일정수심역으로 구성시키고, 일정수심역에 원주구조물을 설치하여 구조물의 위치변화, 파고변화, 쇄파발생의 유무, 쇄파의 발생위치에 따라 구조물에 작용하는 비선형파력 및 비선형파랑변형의 특성을 면밀히 고찰하였다. 이로부터 구조물의 유무에 따른 쇄파파형의 변화정도를 확인하였으며, 구조물에 작용하는 비선형파력과 쇄파의 발생위치와의 상관관계를 확인하였다.

이상의 과정으로부터 얻어진 중요한 사항을 아래에 기술한다.

(1)구조물의 유무에 따라 쇄파파형에서 변화가 발생하며, 일정수심영역의 수심이 클수록 구조물에 의한 반사파의 영향으로 쇄파파형의 변화도 크게 나타난다.

(2)경사면상에서 쇄파가 발생하면 일정수심역에 위치한 구조물에 작용하는 비선형파력의 감소기울기가 사면분기점후에 쇄파가 발생하는 경우보다 크다. 따라서, 일부 영역에서는 파고가 증가하여도 구조물에 작용하는 파력이 작게 나타난다.

(3)쇄파의 발생위치에 따른 파력변화의 특성은 일정수심역의 수심을 변화시키면서 고찰하였고, (2)와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

(4)쇄파지점에 구조물이 근접할수록 파력의 변화기울기는 급격하게 증가하고, 멀어짐에 따라 파력의 변화기울기가 완만해진다.

## <참고문헌>

- Erik, D. C, Dirk, J. W and Narumon, E. (2002) : Vertical variation of the flow across the surf zone., Coastal Engineering, Vol.45, Issues 3-4, pp. 169-198.
- Hur, D. S., Mizutani. N. (2003) : Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater., Coastal Engineering, Vol.47, pp. 329-345.
- Hur, D. S., Mizutani. N., Kim, D. S. (2004) : Direct 3-D numerical simulation of wave forces on asymmetric structures., Coastal Engineering, Vol.51, pp. 407-420.

---

# 5장

## 구조물 주변에서의 흐름과 지형변동의 해석

---

### 1. 개요

파랑으로부터 발생하는 해저면에서 흐름에 의한 소류력(掃流力)이 한계소류력 이상이 되면 저면에서 토사의 이동이 시작되며 파의 비선형성에 기인하여 토사가 이동된다. 저면유속의 흐름방향으로 저면토사는 이동하고, 저면토사의 이동에 따라 지형변동(세굴 또는 퇴적)이 발생하게 된다. 특히, 이러한 저면흐름에 의한 토사이동으로 구조물의 안전성에 심각한 결과가 초래될 수 있으며, 해상교량의 교각, 중력식안벽과 같은 대형구조물에서 세굴을 구조물에 편심하중이 작용되는 원인의 하나로 고려되며, 따라서 구조물의 주변에 있어서 반복적이고 장기간에 걸친 세굴은 구조물 전체의 안정성에 영향을 줄 수 있다.

일반적으로 구조물의 주변에서 지형변동은 구조물의 축조로 인하여 주변의 유황(流況)이 변화되기 때문에 발생하며, 파랑과 조류 등의 흐름이 그 기동력으로 된다. 본 연구에서는 파랑의 비선형성분으로부터 발생하는 흐름에 의해 야기되는 지형변동(세굴과 퇴적)만을 논의한다.

파동장에 있어서의 세굴에 대한 연구는 대부분이 소형구조물과 방파제와 같은 2차원적인 구조물에 한정되어 있고, 회절파의 영향을 고려하여야 하는 방파제의 두부나 대형구조물에 있어서는 비교적 연구가 적다. 특히,  $KC > 6$ 인 소형구조물의 주변에서 국부세굴은 구조물에 의한 와류가 주요한 원인으로 알려져 있지만,  $D/L > 0.1$ 의 경우는 와류로 인한 세굴영향이 작아지므로(Rance, 1980) 대형구조물에 있어서 세굴의 평가는 소형구조물과는 달리 회절파의 영향이 고려되어야 한다.

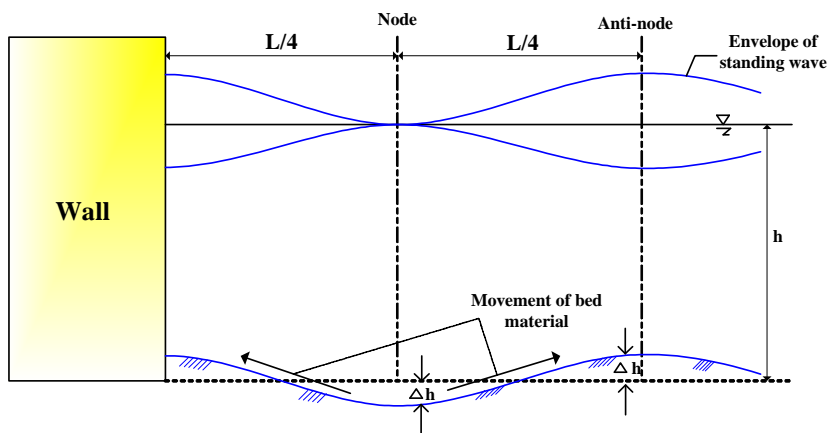
회절파의 영향을 받는 대형구조물의 주변에서 지형변동의 해석을 수행한 기존의 연구에서도 1)비선형성이 충분히 고려되지 않고 있고, 2)원형단면의 연직주상구조물에 한정되어 있으며, 3)쇄파의 영향이 고려되어 있지 않는 등의 한계를 가지고 있다.

본 장에서는 해저면유속성분(최대유속 및 평균유속)과 파고분포의 특성이 연직주상 구조물의 주변에서 세굴과 퇴적에 미치는 영향을 해석하기 위해 본 해석결과와 東江 등(1985)이 원주구조물에 대하여 수행한 수리실험결과 비교하여 상호연관성을 논하고, 齊藤 등(1988)이 제안한 토사이동식에 Full-nonlinear해석법으로부터 산정된 유속과 결합하여 지형변동의 수치시뮬레이션을 수행하며, 동시에 東江 등(1985)의 수리실험결과와 비교한다. 수중연직주상구조물에 의해 파가 쇄파되는 경우에 대해서도 지형변동의 수치시뮬레이션을 수행하고, 수리실험결과와 비교하여 쇄파가 지형변동에 미치는 영향을 고찰한다. 쇄파유무의 검증에 있어서는 3차원 VOF법에 의한 자유수면의 변형으로 파악하고, 도출된 결과와 기존 연구의 내용을 토대로 토사이동식의 적용성을 검토한다.

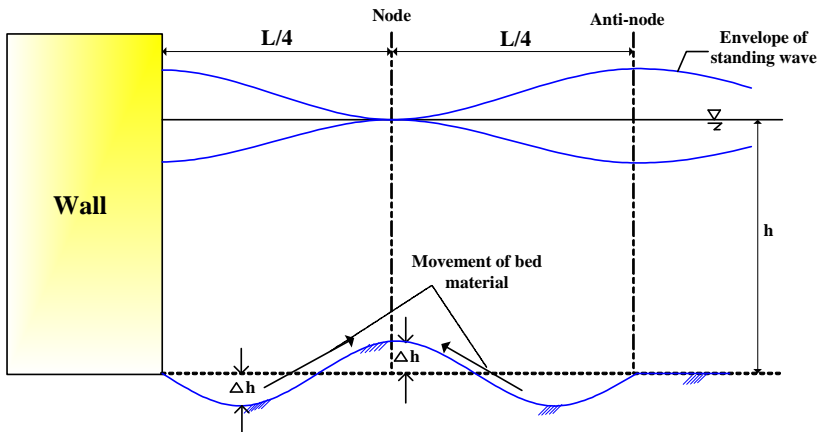
## 2. 직립벽의 전면에서 세굴과 퇴적

회절파의 영향을 고려하여야 하는 대형연직주상구조물의 경우에도 후술하는 세굴 · 퇴적의 경향에서 언급하는 바와 같이 방파제와 같은 세굴 · 퇴적경향을 나타낸다.

중복파의 Node 및 Anti-node에서 세굴 · 퇴적의 경향에 대해 Xie(1981, 1985)에 따르면 직립벽의 전면에서는 저면토사입자의 침강속도에 따라 Fig. 5.1과 같은 저면지형의 세굴 · 퇴적경향을 나타낸다.



(a) In case of the fine sand



(b) In case of the coarse sand

Fig. 5.1 Scour pattern in front of vertical breakwater.

Fig. 5.1과 같은 직립벽의 전면에서 세굴·퇴적의 경향은 일반적으로 다음의 식에 나타내는 바와 같이 저면최대유속( $U_{b\max}$ )과 침강속도( $w_s$ )의 비로 결정되며, 이 값이 10보다 작은 경우에는 Coarse sand, 10보다 큰 경우에는 Fine sand로 구분된다.

$$\frac{U_{b\max}}{w_s} < 10 \quad : \text{Coarse sand} \quad (5.1)$$

$$\frac{U_{b\max}}{w_s} > 10 \quad : \text{Fine sand} \quad (5.2)$$

여기서,  $w_s$  는 식(5.3)과 같이 주어진다(Soulsby, 1997).

$$w_s = \frac{\nu}{D_{50}} \left[ \left( 10.36^2 + 1.049 \hat{D}^3 \right)^{0.5} - 10.36 \right] \quad (5.3)$$

$$\hat{D} = \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D_{50} \quad (5.4)$$

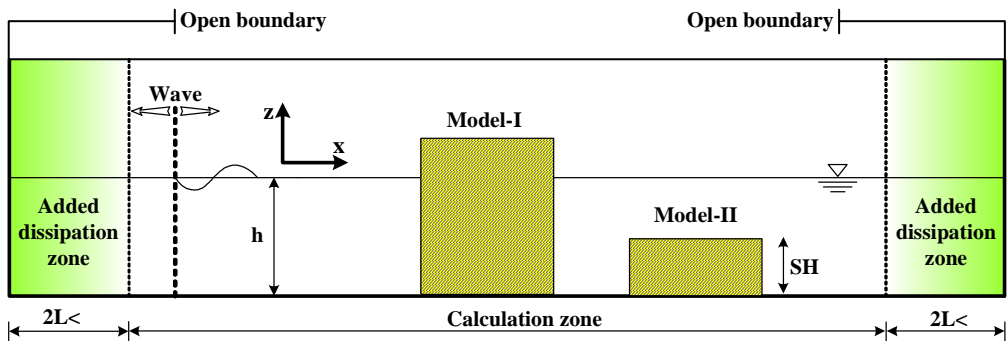
여기서,  $\nu$  는 동점성계수,  $\hat{D}$  는 무차원화된 저면토사의 입경계수,  $s$  는 저면토사의 비중(=2.65),  $g$  는 중력가속도이다.

본 연구에서 적용하는 입사파랑의 제원은 東江 등(1985)의 수리실험조건과 동일하며, 주기( $T$ )는 1.0sec와 1.5sec, 입사파의 파고( $H$ )는 10cm, 수심( $h$ )은 30cm이다. 미소진폭파이론에 의한 저면유속의 최대속도와 침강속도의 비는 각각 10.3, 14.2로 주어지므로 중복파의 Node에서는 세굴이, Anti-node에서는 퇴적이 되는 Find sand형의 지형변동이 나타날 것으로 예상된다.

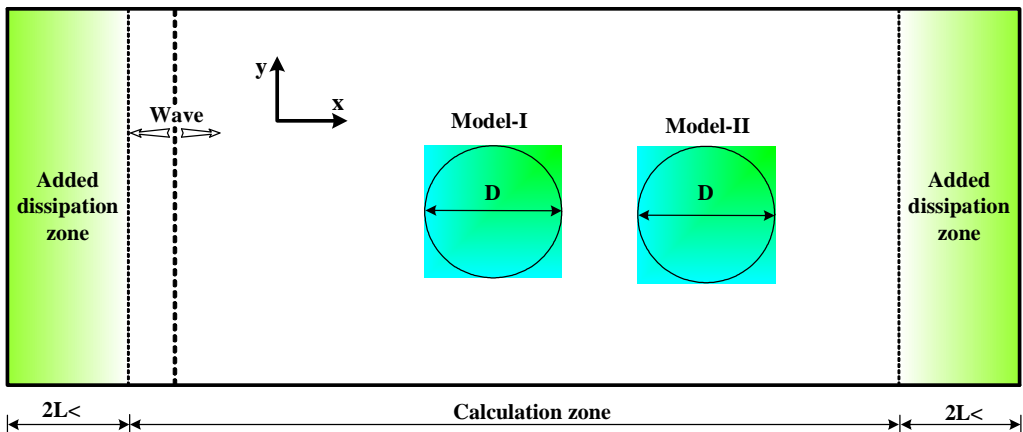
### 3. 연직주상구조물(원형단면)의 주변에서 지형변동의 해석

#### 3.1 수리실험 및 수치해석의 조건

Fig. 5.2는 수치해석에 적용된 원주구조물의 제원과 계산영역을 나타낸 것으로, 구조물의 제원은 東江 등(1985)이 수리실험에 사용된 원주구조물의 제원과 동일하다. 본 연구의 수치해석결과와 비교하기 위하여 사용된 東江 등(1985)의 수리실험조건과 파랑제원은 다음의 Table 5.1과 같으며, *Model-I*은 원주구조물, *Model-II*는 수중원주구조물을 각각 나타낸다.



(a) Side view



(b) Plan view

Fig. 5.2 Definition sketch of 3D numerical wave basin.



Table 5.1 Experimental conditions(Toe's, 1985)

Sediment median diameter : $D_{50}$ (mm)	0.15
Period $T$ (s)	1.0, 1.5
Wave height $H$ (cm)	10
Depth $h$ (cm)	30
Diameter $D$ (cm)	117
Measurement of Experimental result	after 2 hours
Submerged cylinder height( <i>model-II</i> ) : $SH$ (cm)	15

## 3.2 파랑특성이 지형변동에 미치는 영향

### 3.2.1 Model-I

#### (1)수리실험결과( $T=1.0s, H=10cm$ )

Fig. 5.3은 *Model-I*,  $T=1.0s$ ,  $H=10cm$ 에 있어서 파에 의한 원주구조물의 주변에서 지형변동(세굴·퇴적)의 경향을 나타낸 東江 등(1985)의 수리실험결과를 도식화한 것이다. 그림 중에 Hatch로 표시된 부분에서 교차된 사선인 경우는 퇴적, 사선인 부분은 세굴을 나타낸다. 수리실험결과에서 등고선의 수치는 각각 세굴과 퇴적의 깊이를 cm단위로 나타낸 것이다.

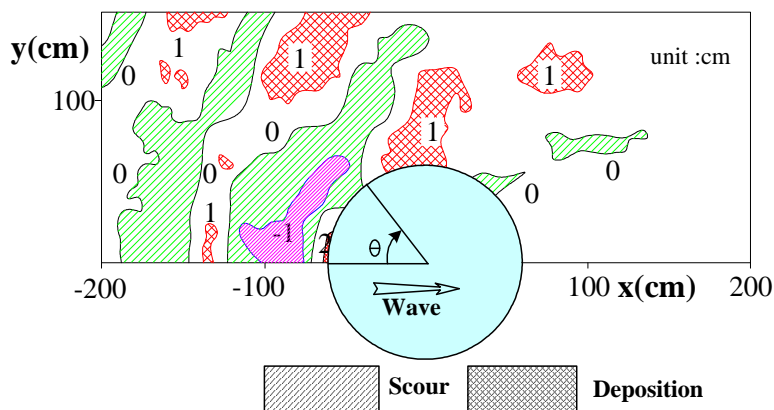


Fig. 5.3 Scour pattern around a vertical circular cylinder(*Model-I*,  $T=1.0s$ ,  $H=10cm$ ).

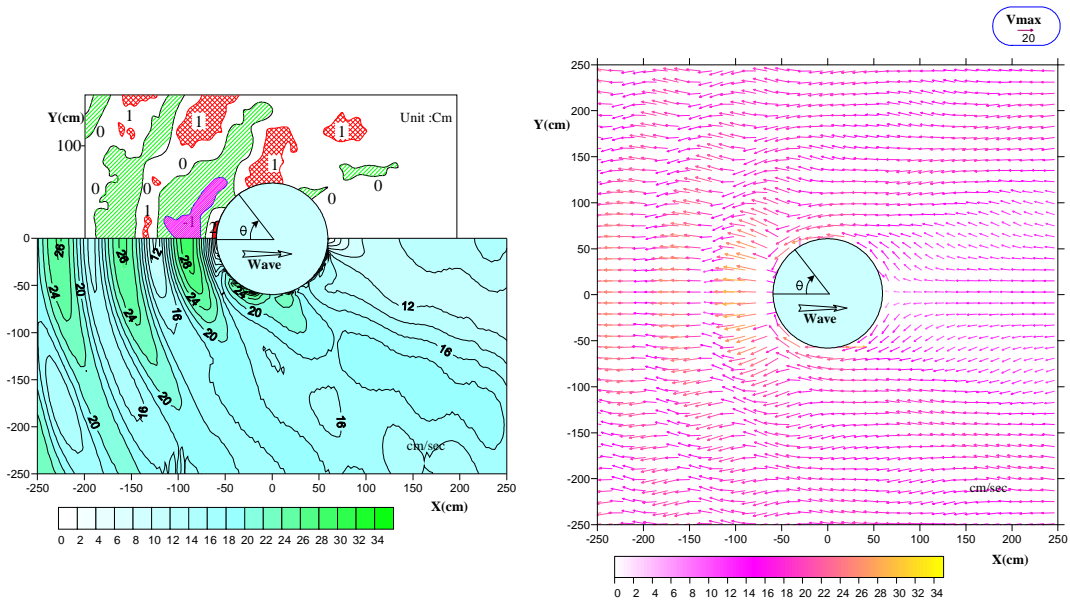
Fig. 5.3에서  $\theta=0^\circ$ 인 구조물의 전면에서  $-x$ 축의 방향으로 <퇴적><세굴><퇴적><세굴>의 순서로 저면지형의 변동특성이 나타나는 것은 전술한 Find sand의 경우에 있어서 직립벽의 전면에서 세굴·퇴적의 경향과 일치하고 있다. 구조물의 측면인  $\theta=90^\circ$ 의 부근에서는 퇴적이,  $\theta=120^\circ$ 의 부근에서는 0 ~ -1cm미만의 세굴이 나타나고, 구조물의 후면에서는 지형변동이 나타나지 않는다.

## (2)저면유속 및 수위분포와 지형변동과의 관계( $T=1.0s, H=10cm$ )

Fig. 5.4(a)의 상단부에 있는 그림은 Fig. 5.3에 나타낸 東江 등(1985)의 수리실험결과를 나타내고, 하단부의 그림은 본 해석법에 의한 저면유속에 대해 한주기 동안에 합벡터의 크기가 최대인 경우( $x$  방향의 속도  $u$ ,  $y$  방향의 속도  $v$ )에 최대유속벡터  $\bar{V}_{max}$ 의 등유속선도를 나타낸 것이다. Fig. 5.4(b)는 해저면에서 최대유속벡터를 나타낸 것으로, 본 해석의 결과이다. Fig. 5.4(b)에서 전체적인 최대유속벡터의 방향은 파랑입사방향의 반대방향으로 향하고 있으며, 구조물의 전면( $\theta=0^\circ$ )에서  $-x$ 축의 방향으로  $x \approx -60cm$ 에서  $\bar{V}_{max}$ 의 방향성이 바뀌고,  $x \approx -100cm$ 에서 Fig. 5.4(a)의 등유속선도에서 보는 바와 같이 최대유속이 나타나며,  $-x$ 축의 방향을 따라 유속이 <증가><감소><증가>하는 경향이 나타난다.

구조물의 전면에서  $-x$ 축의 방향으로 유속변화의 특성과 지형변동과의 상관관계를 살펴보면 상대적으로 유속이 작은 영역에서는 퇴적이 발생하고, 유속이 큰 영역에서는 세굴이 발생하며, 구조물의 전면에서 최대유속이 나타나는 곳에서 수리실험결과에서도 최대세굴이 나타나므로 지형변동과 유속과의 상관성을 확인할 수 있다. 이와 같은 유속과 저면지형변동에 대한 메커니즘은 저면유속이 이동한계유속의 이상이 되면 저면의 토사가 이동하고, 이동한계유속의 이하인 곳에서는 이동된 토사가 퇴적하기 때문으로 판단된다.

수리실험결과에서 퇴적이 나타나는 부분인 구조물의 중심에서  $\theta=90^\circ$ 의 방향은 세굴이 발생하는  $\theta=120^\circ$ 의 부분에 비해 최대유속은 상대적으로 크지만, 퇴적이 발생하는 것은 구조물의 전면( $\theta=0^\circ$ )에서  $x \approx -100cm$ 의 부근에 비해 상대적으로 유속이 작으므로 구조물의 전면에서 세굴된 토사가 이동된 것으로 판단된다.



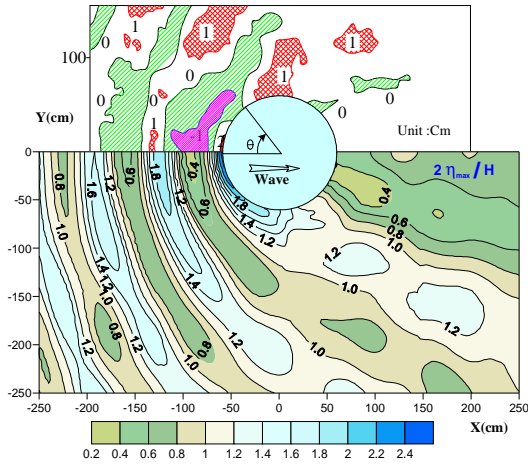
(a) Contour plot of maximum velocity

(b) Vector plot of maximum velocity

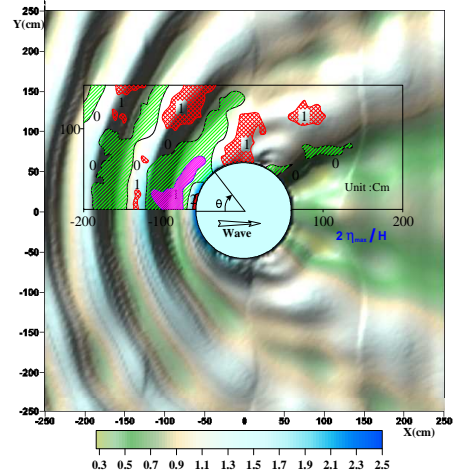
Fig. 5.4 Maximum velocity around a vertical circular cylinder

(Model-I,  $T=1.0s$ ,  $H=10cm$ ).

Fig. 5.5는 최대진폭을 입사파의 진폭으로 무차원화한 무차원최대진폭  $2\eta_{max}/H$ 을 나타낸 본 해석결과로, Fig. 5.5(a)의 상부는 東江 등(1985)의 수리실험결과이고, 하부는 무차원 최대진폭의 등고선도를 나타낸 것이다. Fig. 5.5(b)는 무차원최대진폭을 3차원화하여 나타낸 것이며, 파랑입사방향으로 빛을 두어 그림자의 효과로 Anti-node를 밝게 나타내었다. 東江 등(1985)이 MacCamy & Fuchs(1954)의 해석해에 의한 회절파랑의 파고분포와 실험치를 비교한 결과에 의하면 중복파의 파고분포와 세굴·퇴적의 상관관계에 대해 언급한 바와 같이 구조물의 전면에서 -x축의 방향으로 중복파의 Node 부분에서는 세굴이, Anti-node에서는 세굴이 나타난다고 지적하고 있다. 이로부터 본 연구에서는 저면유속과 침강속도의 비  $U_{bmax}/w_s$ 가 10보다 큰 Find sand의 조건에 해당되므로 원주구조물의 전면에서는 직립벽의 전면에서 세굴·퇴적의 경향과 같이 중복파의 Node 부분에서는 세굴이, Anti-node 부분에서는 퇴적이 나타난다. 그리고, 구조물의 측면부분( $x = -50 \sim -100cm$ ,  $y = 100 \sim 150cm$ )에서 약 1cm의 퇴적분포가 나타나는 곳도 Anti-node에 해당되는 곳으로, 중복파에 따른 저면유속의 변화가 구조물의 주변지형변동에 미치는 영향을 알 수 있다.



(a) Contour plot of  $2\eta_{max}/H$



(b) 3D surface plot of  $2\eta_{max}/H$

Fig. 5.5 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$  for vertical circular cylinder.

Fig. 5.6은 저면에서 평균유속을 나타낸 본 해석결과로, Fig. 5.6(a)는 저면에서  $x$  방향의 속도  $u$  와  $y$  방향의 속도  $v$  를 평균하여 나타낸 평균유속벡터  $\bar{V}_{mean}$  의 등유속선도이고, Fig. 5.6(b)는 평균유속벡터를 나타낸 것이다.

구조물의 전면에서 평균유속의 크기가 상대적으로 작게 나타나고, 구조물의 측면방향( $\theta=45^\circ\sim 120^\circ$ )으로 평균유속이 상대적으로 크게 나타난다(대략 4~6cm/sec). 이러한 경향은 구조물의 전면에서는 중복파의 영향으로 (+), (-)방향의 유속의 차이가 작기 때문이며, 측면에서는 중복파의 영향이 작아짐에 따라 (+), (-)방향에 따른 유속의 차가 크기 때문에 평균유속이 상대적 크게 나타나는 것으로 판단된다.

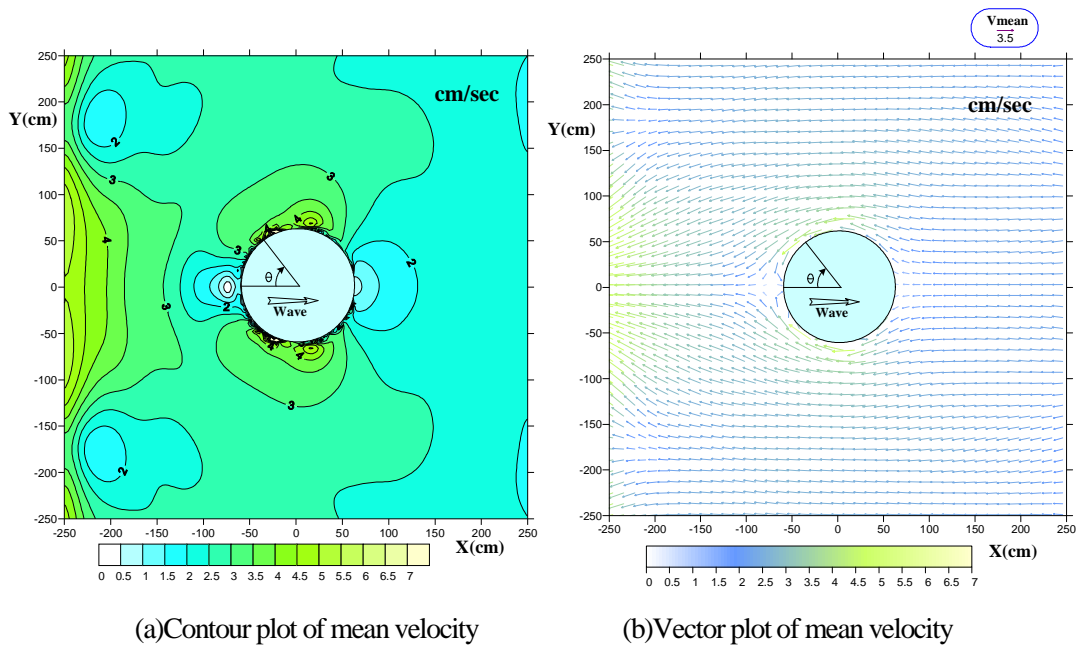


Fig. 5.6 Mean velocity around a vertical circular cylinder.

### (3) 수리실험결과( $T=1.5s, H=10cm$ )

Fig. 5.7은 인 경우에 있어서 원주구조물의 주변에서 지형변동을 나타낸 東江 등 (1985)의 수리실험결과로, Hatch가 교차사선인 부분은 퇴적을, 사선인 부분은 세굴을 각각 나타낸다.

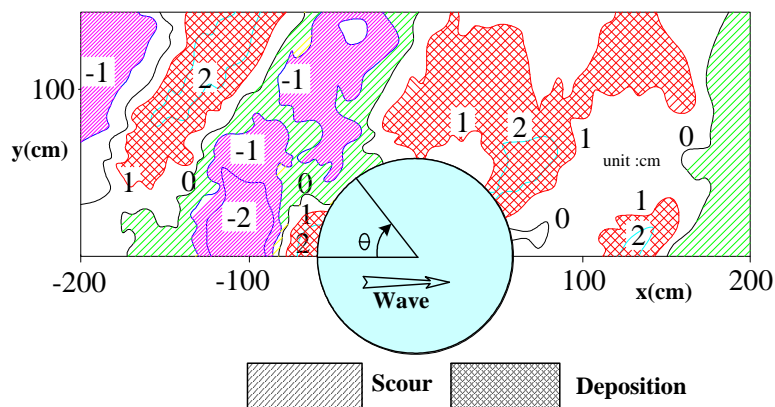


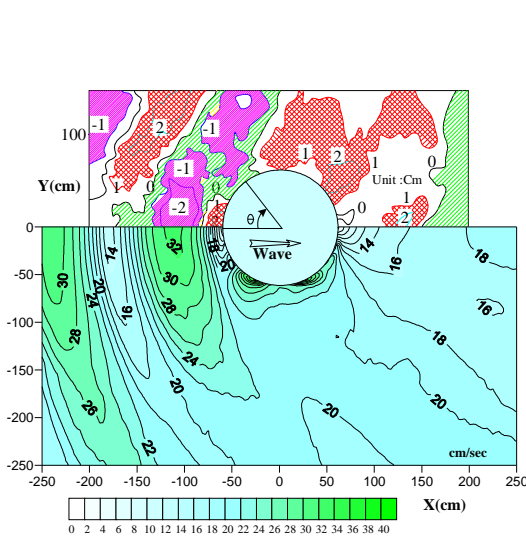
Fig. 5.7 Scour pattern around a vertical circular cylinder( $Model-I, T=1.5s, H=10cm$ ).

Fig. 5.3의  $T=1.0s$ 의 경우와 비교하면 주기가 길어짐에 따라 나타나는 수리실험결과의 차이는 구조물의 전면에서  $-x$ 축의 방향으로 세굴·퇴적의 경향은  $T=1.0s$ 의 경우와 동일하다. 그러나, 주기가 길어짐에 따라 세굴·퇴적의 정도와 범위는  $T=1.0s$ 에 비해 크게 나타나고 있다. 수리실험영역중에  $x=-50cm\sim-100cm$ ,  $y=100cm\sim200cm$ 의 범위에 있어서는

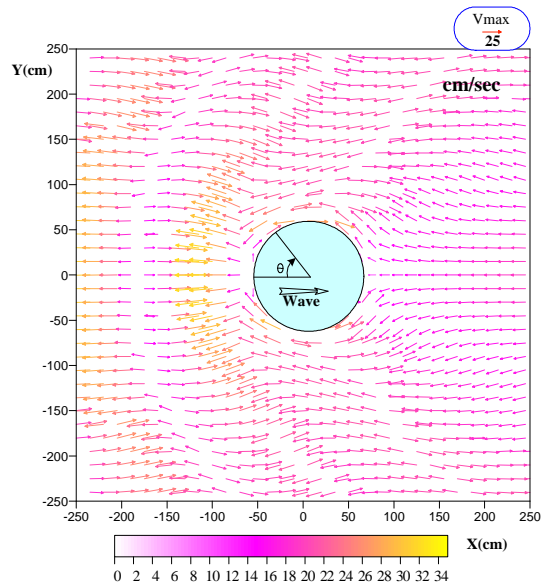
$T=1.0s$ 인 경우는 퇴적이 발생하지만,  $T=1.5s$ 의 경우는 세굴이 발생하고 있으며,  $\theta=90^{\circ}\sim150^{\circ}$ 의 방향으로도  $T=1.0s$ 의 경우에 비해 퇴적영역이 넓게 분포하고 있다. 구조물의 후면에 있어서는 토사이동이 없는  $T=1.0s$ 의 경우와는 달리  $x\approx 120cm$ 의 부분에서는 퇴적이,  $x\approx 150cm$ 의 이후에서는 세굴이 나타난다. 이러한 경향은 주기가 길어질수록 저면유속이 커져서 저면지형변동에 미치는 영향이 커지고, 이에 따라 세굴·퇴적의 정도와 범위가 넓게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 주기가 길어짐에 따라 구조물의 후면에서도 파랑의 영향이 작용하여 지형변동이 나타나는 것을 알 수 있다.

#### (4)저면유속 및 수위분포와 지형변동과의 관계( $T=1.5s, H=10cm$ )

Fig. 5.8(a)는 원주구조물의 주변에서 지형변동을 나타낸 東江 등(1985)의 수리실험결과(상단부)와 최대유속벡터크기  $|\bar{V}_{max}|$ 의 등유속선도(하단부)를 각각 나타내었고, Fig. 5.8(b)는 본 해석에 의한 최대유속벡터  $\bar{V}_{max}$ 를 나타낸 것이다. Fig. 5.8에서 유속이 상대적으로 큰 영역은 세굴이 발생하고, 유속이 상대적으로 작은 영역에서 퇴적이 발생하는 것과, 구조물의 전면에서  $-x$ 방향으로 나타나는 전반적인 결과는  $T=1.0s$ 인 경우와 동일하지만,  $T=1.0s$ 에 비해 주기가 길어짐에 따라  $\bar{V}_{max}$ 의 방향성은  $T=1.0s$ 의 경우와는 다른 경향을 나타낸다.  $T=1.0s$ 의 경우에  $\bar{V}_{max}$ 는 전반적인 방향성은 파랑입사방향의 반대방향인  $-x$ 방향으로 나타나고,  $T=1.5s$ 인 경우는  $\bar{V}_{max}$ 의 방향성인  $-x$ 축의 방향과  $+x$ 축의 방향으로 나누어지며, 방향성이 바뀌는 부분은 중복파의 파고분포의 형태로 전영역에 걸쳐서 형성된다.



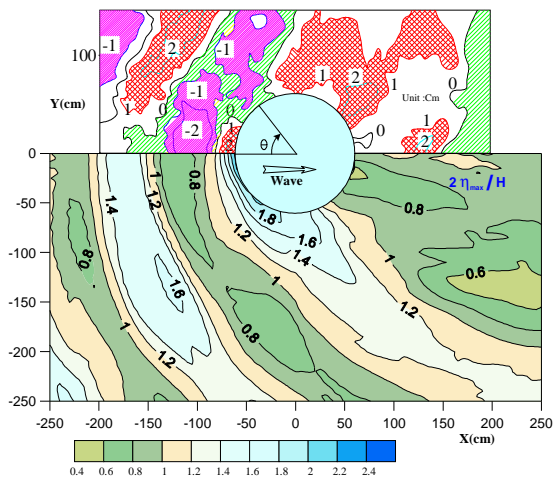
(a) Contour plot of maximum velocity



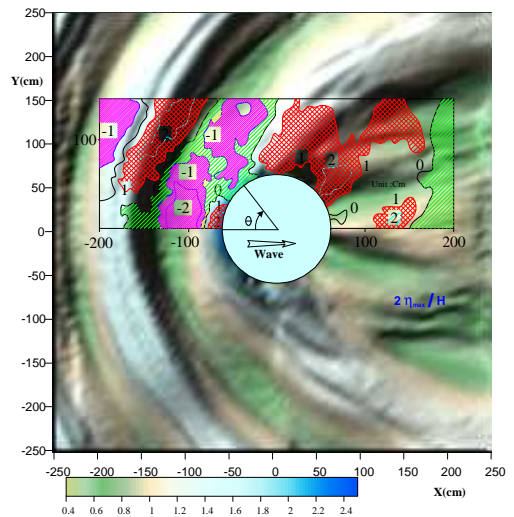
(b) Vector plot of maximum velocity

Fig. 5.8 Maximum velocity around a vertical circular cylinder(*Model-I*,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ ).

Fig. 5.9는  $T=1.5s$ 의 경우에 있어서 무차원최대진폭분포를 나타낸 본 해석결과로, Fig. 5.9(a)는 무차원최대진폭의 등고선도이고, Fig. 5.9(b)는 무차원최대진폭의 표면파형을 3차원화하여 나타낸 것이다.  $T=1.0s$ 의 경우와 마찬가지로 그림자의 효과로 밝게 나오는 부분이 Anti-node에 해당된다.  $T=1.0s$ 에 비해 파장이 길어짐에 따라 Anti-node 사이의 간격이 길어지며, 구조물의 배후에서도 최대진폭의 값이  $T=1.0s$ 에 비해 크게 나타난다. 수리실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 Node 주위에서 세굴이, Anti-node에서는 퇴적이 발생하는 경향으로 판단할 때, 주기가 길어져도 파고분포가 저면지형에 미치는 영향은 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다.



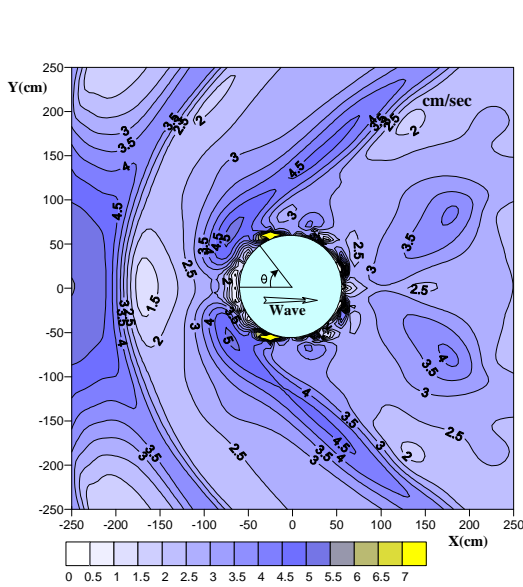
(a) Contour plot of  $2\eta_{max}/H$



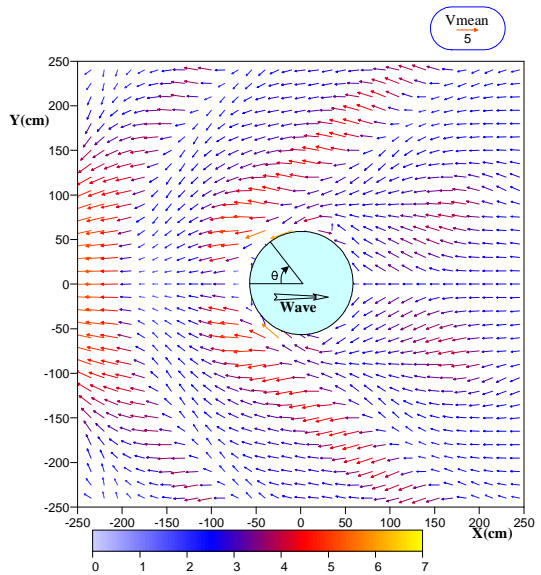
(b) 3D surface plot of  $2\eta_{max}/H$

Fig. 5.9 Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels  $2\eta_{max}/H$  around a vertical circular cylinder.

Fig. 5.10은 *Model-I*,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ 인 경우에 대한 본 해석결과로, Fig. 5.10(a)는 평균유속벡터  $|\bar{V}_{mean}|$ 의 등유속선이고, Fig. 5.10(b)는 평균유속벡터  $\bar{V}_{mean}$ 을 나타낸 것이다. 전 영역에서 평균유속의 크기의 변화가 적은 Fig. 5.6의  $T=1.0s$ 인 경우와는 달리 중북과의 Node와 Anti-node에 해당되는 부분에서 평균유속이 상대적으로 크게 나타난다.



(a) Contour plot of mean velocity



(b) Vector plot of mean velocity

Fig. 5.10 Mean velocity around a vertical circular cylinder(*Model-I*,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ )



### 3.2.2 Model-II

#### (1) 수리실험결과( $T=1.5s, H=10cm$ )

Fig. 5.11은 *Model-II*,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ 이고, 수중원주구조물의 높이( $SH$ )가  $15cm$ 인 경우에 있어서 東江 등(1985)의 수리실험결과를 나타낸 것으로, Hatch가 교차사선인 부분은 퇴적을 나타내고, 사선인 부분은 세굴을 나타내며, 등고선의 수치는 각각 세굴과 퇴적의 크기(Unit:cm)를 나타낸다. 특히, Fig. 5.11은 수중원주구조물에 의해 파가 쇄파되는 경우에 세굴 · 퇴적경향을 나타낸 수리실험결과이다.

기존의 연구에서는 수중구조물의 상면으로 파랑이 월파하는 경우와 수중구조물에 의해 파가 쇄파하는 경우에 대한 지형변동은 수치해석적으로 접근할 수 없었기 때문에 수리실험결과로 월파와 쇄파로 인한 지형변동의 영향을 논의하였다.

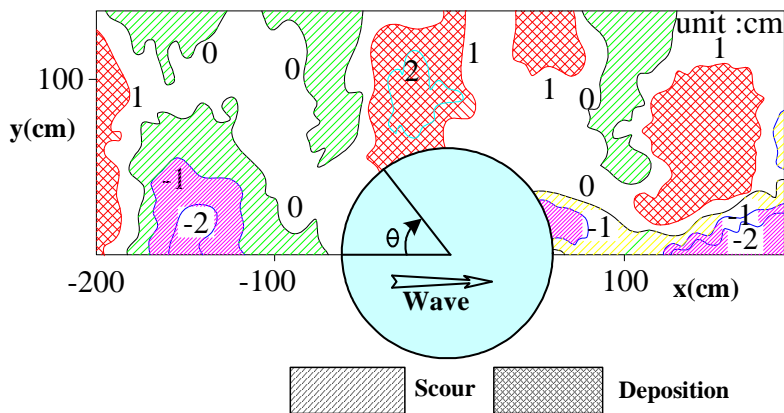
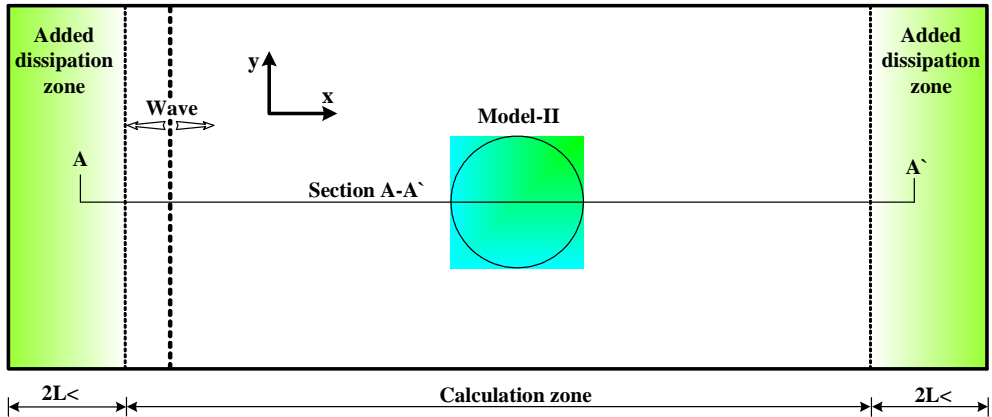


Fig. 5.11 Scour pattern around a vertical circular cylinder(*Model-II*,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ ).

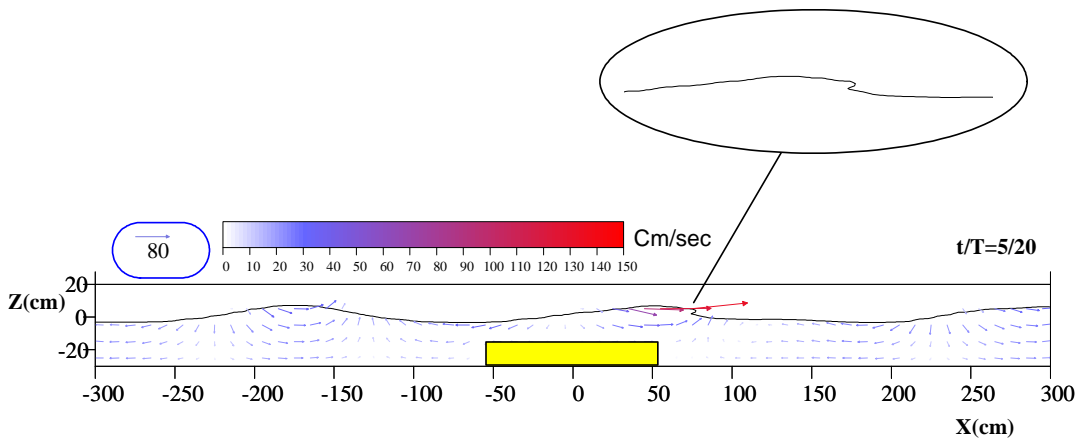
본 연구에서는 3차원 VOF법에 의해 산정된 자유수면으로부터 쇄파발생의 여부를 검증하였다. Fig. 5.12는 3차원 VOF법에 의해 산정된 자유수면의 변화를 나타낸 것으로, (b)는 (a)의 단면 A-A'에 있어서 자유수면의 변화를 나타낸 것이다. 구조물의 후면  $x \approx 80cm$ 에서 쇄파가 발생함을 알 수 있다.

*Model-I*,  $T=1.5s$ 인 원주구조물의 수리실험결과와 *Model-II*,  $T=1.5s$ 인 수중원주구조물에 의해 파가 쇄파되는 경우의 수리실험결과를 비교하면 구조물의 전면에서는 원주구조물

과는 달리 퇴적이 발생하지 않으며, 구조물의 전면에서 최대세굴이 발생하는 부분도 원주구조물의 경우는  $x \approx -100\text{cm}$ 의 부근에서 발생하지만, 수중원주구조물의 경우는  $x \approx -150\text{cm}$ 의 인근에서 발생하고, 세굴의 범위도 연직주상구조물에 비해 작다. 구조물의 측면방향으로 퇴적의 범위도 작게 나타나며, 특히 구조물의 후면에 세굴이 발생하는 것이 특이할 만한 사항으로, 율파된 파랑이 구조물의 후면에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(a) Definition sketch of section A-A'

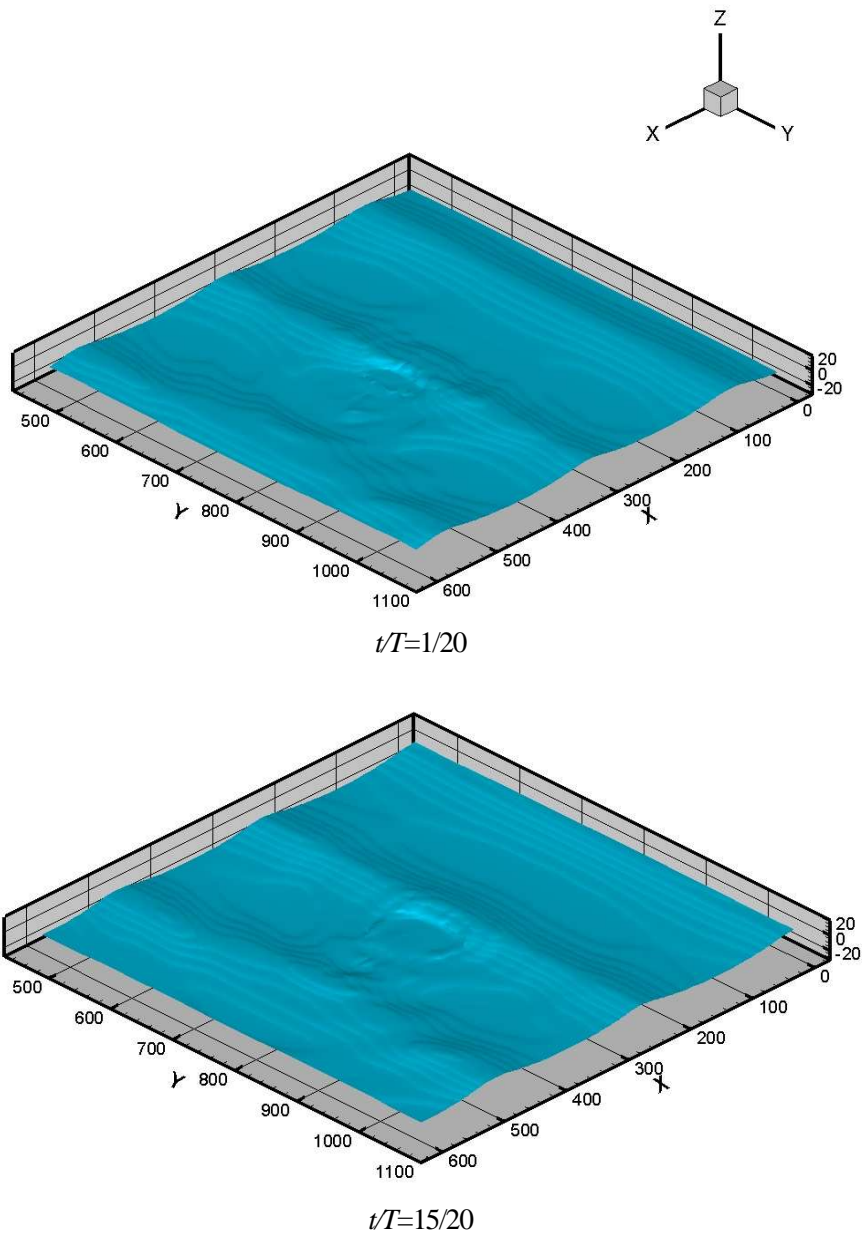


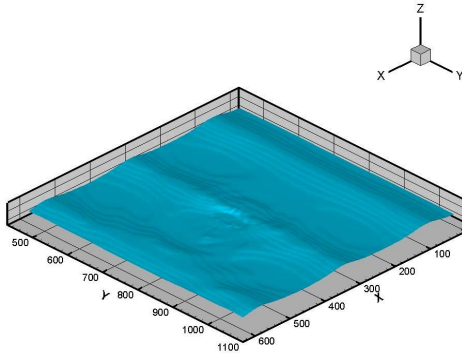
(b) Section A-A'

Fig. 5.12 Wave breaking in submerged vertical circular cylinder

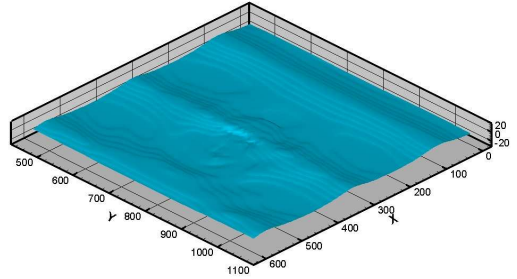
(Model-II,  $T=1.5\text{s}$ ,  $H=10$ ,  $SH=16\text{cm}$ ).

Fig. 5.13은 수중원주구조물에 의해 파가 쇄파되는 현상을 표현하기 위해 3차원 VOF 법에 의해 산정된 자유수면의 변화를 수중구조물의 높이  $SH=26\text{cm}$ 인 경우에 있어서  $t/T=1/20$  간격으로 나타낸 것으로 수중연직주상구조물의 상면으로 파가 월파하면서 쇄파 되는 현상을 잘 재현하고 있다.

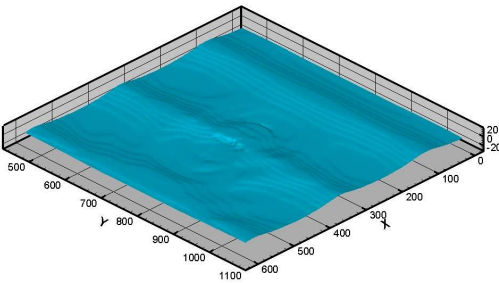




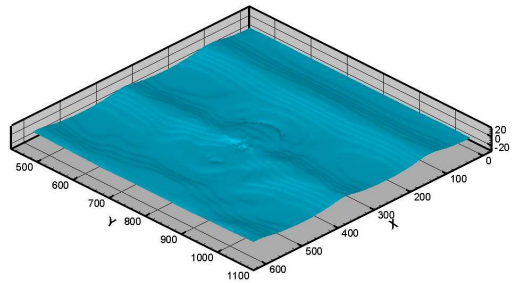
$t/T=1/20$



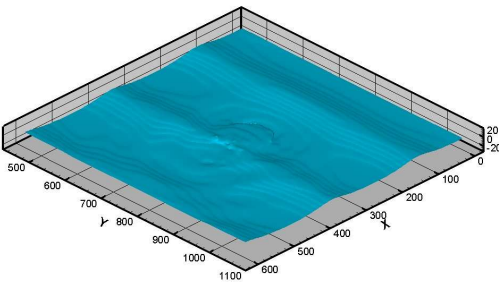
$t/T=2/20$



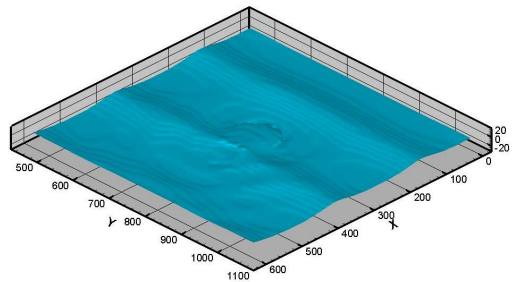
$t/T=3/20$



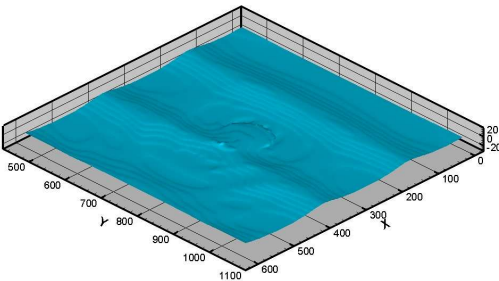
$t/T=4/20$



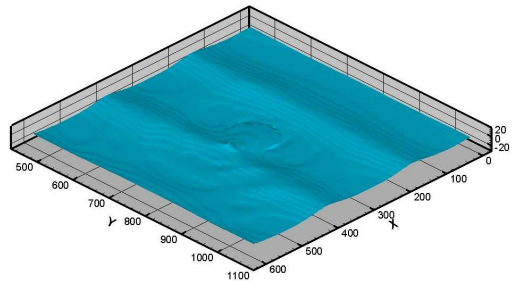
$t/T=5/20$



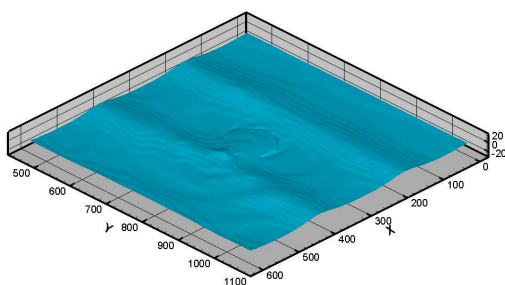
$t/T=6/20$



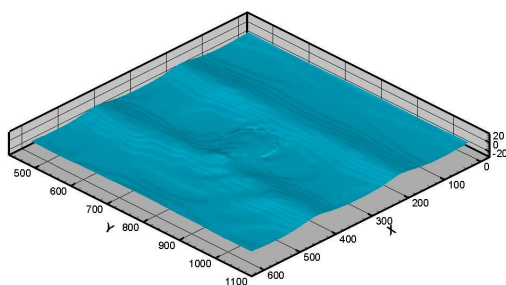
$t/T=7/20$



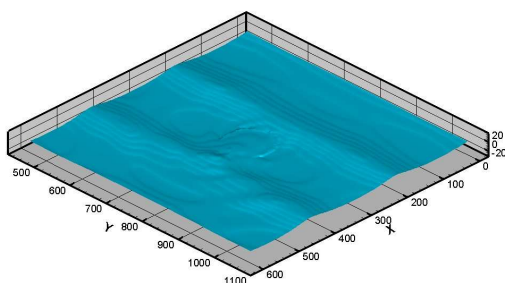
$t/T=8/20$



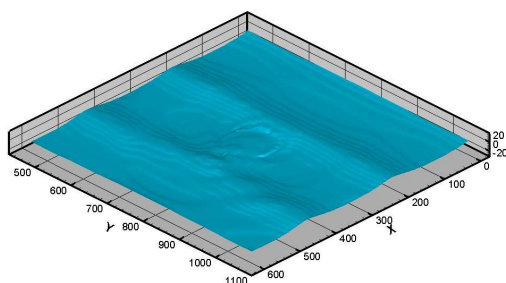
$t/T=9/20$



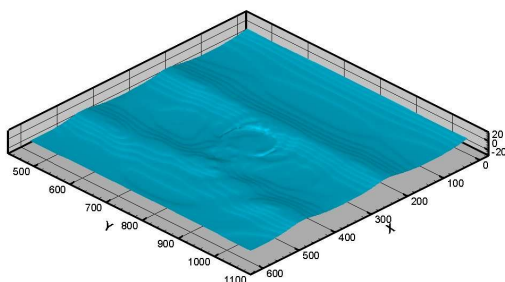
$t/T=10/20$



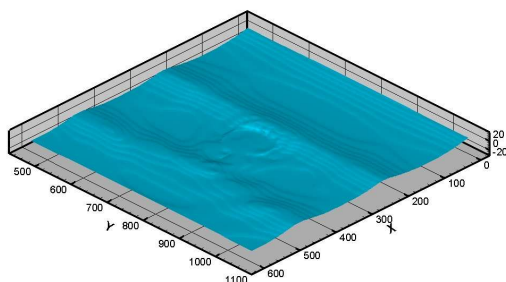
$t/T=11/20$



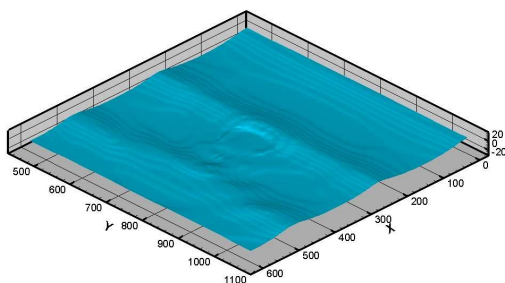
$t/T=12/20$



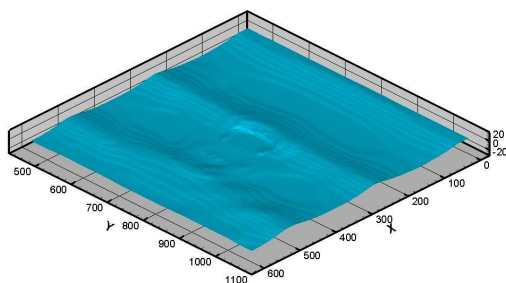
$t/T=13/20$



$t/T=14/20$



$t/T=15/20$



$t/T=16/20$

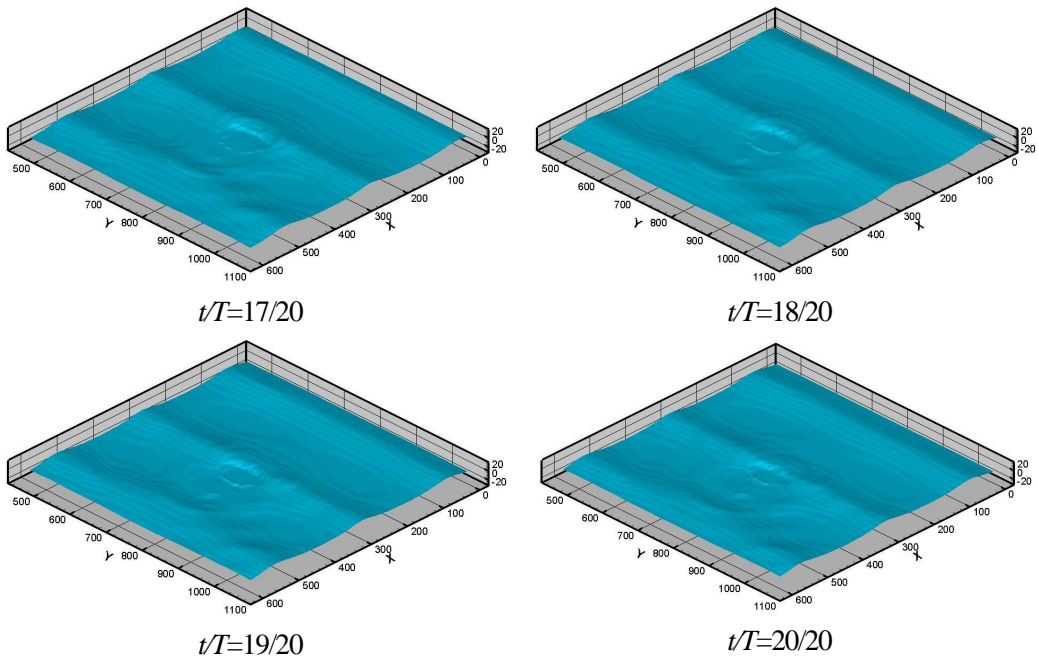


Fig. 5.13 Surface plot of water surface profiles

(Model-II,  $T=1.5s$ ,  $H=10$ ,  $SH=26cm$ ).

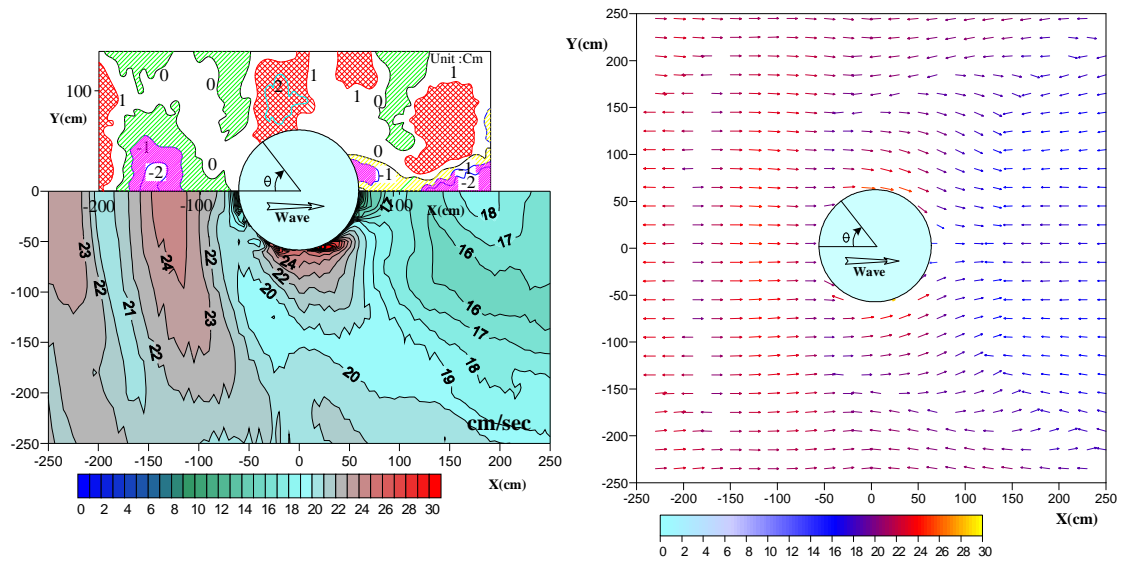
## (2)저면유속과 지형변동과의 관계( $T=1.5s$ , $H=10cm$ )

Fig. 5.14(a)는 수중원주구조물의 주변에서  $|\bar{V}_{max}|$ 의 등유속선도와 東江 등(1985)의 수리실험결과를 나타내었고, Fig. 5.14(b)는 본 해석에 의한  $\bar{V}_{max}$ 를 나타낸 것이다. 전술한 Model-I,  $T=1.0s$  &  $T=1.5s$ 의 경우와 동일하게 최대유속이 발생하는 부분에서 최대세굴이 발생하며, 구조물의 주변에서  $\bar{V}_{max}$  크기의 상대적인 변화는 Model-I의 연직주상구조물에 비해 적다.

Fig. 5.15(a)는  $|\bar{V}_{mean}|$ 의 등유속선도이고, (b)는  $\bar{V}_{mean}$ 을 나타낸 본 해석결과로, 전평균 유속의 흐름은 파랑입사방향의 반대방향으로 나타나며, 평균유속이 작게 나타나는 부분은  $x \approx -150cm$ ,  $y \approx 0cm$ 의 영역이며,  $x=-150cm$ ,  $y=-150\sim 150cm$ 의 범위에서는 평균유속의 변화가 가장 크게 나타나는 부분으로, 수중원주구조물에 의한 반사파의 영향이 급변하는 영역으로 판단된다. 원주구조물의 세굴특성과 비교해 볼 때 최대세굴이 나타나는 부분이 원주구조물의 경우보다 구조물에서 멀리 형성되는 것을 알 수 있고, 수중원주구



조물의 높이가 높아질수록 최대세굴이 발생하는 부분은 원주구조물에 가까운 경향을 나타낼 것으로 판단된다.

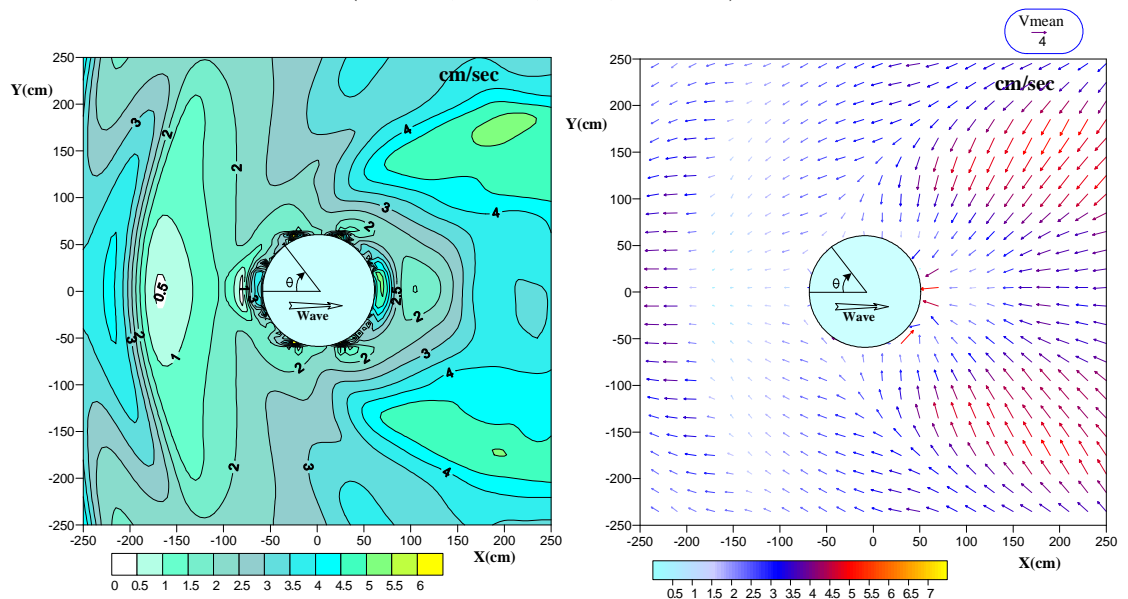


(a) Contour plot of maximum velocity

(b) Vector plot of maximum velocity

Fig. 5.14 Maximum velocity around a submerged vertical circular cylinder

(Model-II,  $T=1.5s$ ,  $H=10$ ,  $SH=16cm$ ).



(a) Contour plot of mean velocity

(b) Vector plot of mean velocity

Fig. 5.15 Mean velocity around a submerged vertical circular cylinder

(Model-II,  $T=1.5s$ ,  $H=10$ ,  $SH=16cm$ ).

## 4. 지형변동의 수치시뮬레이션

### 4.1 토사이동식

연직원주구조물의 주변에서 지형변동의 수치시뮬레이션에 齊藤 등(1988)은 질량수송 속도  $U_m$  과 Radiation stress의 경사를 외력으로 하는 정상류  $U$  의 성분을 구하고, 渡邊 등(1984)이 제안한 토사이동공식을 이용하여 Shield수와  $U_m$ ,  $U$  의 관계에 관해 다음의 식을 제안하였다.

$$q_s = A(\Psi_m - \Psi_c)(\overline{U_m} + \overline{U})D_{50} \frac{1}{1 - \lambda_v} \quad (5.5)$$

여기서,  $q_s$  는 단위폭당의 이동량,  $\Psi_m = f_w u_{b\max}^2 / 2gD_{50}(s-1)$  는 순간 Shields parameter,  $f_w$  는 파의 마찰계수,  $g$  는 중력가속도,  $u_{b\max}$  는 해저에서 물입자궤적속도의 최대치,  $D_{50}$  은 저질의 중앙입경,  $A$  는 무차원경험상수,  $s$  는 저질의 비중,  $\Psi_c$  는 한계 Shields parameter,  $\lambda_v$  는 저질의 공극율을 각각 나타낸다.

본 연구에서도 해빈변형의 수치해석시에 평균류의 개념으로 접근하는 渡邊(1981)의 연구에서와 같이 Navier-Stokes의 운동방정식과 수면에서 VOF함수의 이류방정식으로 산정된 저면에서의 평균유속  $\bar{V}_{mean}$  을 적용하여 토사이동식을 식(5.6)과 같이 나타내고, 지형변동의 수치시뮬레이션을 수행하여 본 장의 3절에서 논의한 東江 등(1985)의 수리실험 결과와 비교하는 것으로 한다.

$$q_s = A(\Psi_m - \Psi_c)(\bar{V}_{mean})D_{50} \frac{1}{1 - \lambda_v} \quad (5.6)$$

여기서, 한계 Shields parameter  $\Psi_c$  는 다음의 식으로 주어지는 Van Rajn(1984)의 결과를 적용하였다.



$$\left\{ \begin{array}{ll} \Psi_c = \frac{0.24}{D_*} & \text{for } D_* \leq 4 \\ \Psi_c = \frac{0.14}{D_*^{0.64}} & \text{for } 4 < D_* \leq 10 \\ \Psi_c = \frac{0.04}{D_*^{0.10}} & \text{for } 10 < D_* \leq 20 \\ \Psi_c = \frac{0.013}{D_*^{0.29}} & \text{for } 20 < D_* \leq 150 \\ \Psi_c = 0.055 & \text{for } D_* > 4 \end{array} \right. \quad (5.7)$$

여기서,  $D_*$  는 Particle parameter로서 다음과 같이 주어진다.

$$D_* = D_{50} \left\{ \frac{(s-1)}{v^2} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (5.8)$$

식 (5.6)에서 파의 마찰계수  $f_w$  는 다음의 식으로 주어지는 Swart(1974)의 공식을 적용하였다.

$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{A_b}{k_s} \right)^{-0.194} \right] \quad \text{for } \frac{A_b}{k_s} > 1.57 \quad (5.9)$$

$$f_w = 0.3 \quad \text{for } \frac{A_b}{k_s} \leq 1.57 \quad (5.10)$$

여기서,  $k_s$  는 상대조도높이( $= D_{50}$ ),  $A_b$  는  $u_b / \sigma$  에 의해 평가되는 궤적운동의 진폭을 각각 나타낸다.

## 4.2 저면지형변동의 평형상태

파랑에 의해 발생하는 저면유속이 저면토사의 이동한계유속보다 크면 토사가 이동한다. 그러나, 파의 영향으로 인한 지형변동은 일정시간이 지나면 저면지형의 큰 변화가 없는 평형상태에 도달하게 된다. 기존의 연구에서는 평형상태에 이르는 시간에 대해 Xie(1981)는 방파제의 전면영역에 있어서는  $t/T$  ( $t$ 는 시간,  $T$ 는 파의 주기)가 약 5,000과 정도에서 평형상태에 도달한다고 언급하고 있으며, 연직주상구조물에 있어서는 약  $t/T=7,200$  파에서 지형이 평형상태에 달한다는 勝井 등(1992)의 연구가 있다. 따라서, 본 연구에서는 수리실험결과로부터 얻어진 것과 동일한 측정시간인  $t/T=7,200$ 의 파를 적용하여 이동토사의 변동량을 산정한다.

저면지형의 연속식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial h(x, y, t)}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial q_{sx}(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}(x, y, t)}{\partial y} \right\} \quad (5.11)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $q_{sx}$ 와  $q_{sy}$ 는 각각  $x$ 방향,  $y$ 방향으로 단위시간 및 단위폭당의 토사이동량이다.

지형변동이 평형상태의 시간  $t_c$ 에 달하면 지형변동이 없다는 조건을 적용하면 식 (5.11)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta h(x, y, t) = \Delta h_c(x, y) \quad t \geq t_c \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_c(x, y) &= \int_0^{t_c} \left\{ \frac{\partial q_{sx}(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}(x, y, t)}{\partial y} \right\} dt \\ &\equiv \left\{ \frac{\partial q_{sx}(x, y, 0)}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}(x, y, 0)}{\partial y} \right\} T_c \end{aligned} \quad (5.13)$$

여기서,  $\Delta h_c$ 는 평형상태의 지형변동을,  $T_c$ 는 평형상태에 이르는 시간  $t/T=7,200$ 를 각각 나타낸다.

식(5.6)의 Shield parameter  $\Psi_m$ 의 산정시에 사용되는  $f_w$ 는 저면유속벡터의 절대치의 최대  $u_{b\max}$ 로 결정되는 값이기 때문에 토사이동량  $q_s$ 의 산정시에  $\vec{V}_{mean}$ 의 절대치로 산정하고, 벡터의 방향성을 고려하여  $x, y$  방향의 토사이동량  $q_{sx}, q_{sy}$ 를 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$q_s = A(\Psi_m - \Psi_c) \left( \left| \vec{V}_{mean} \right| \right) D_{50} \frac{1}{1 - \lambda_v} \quad (5.14)$$

$$q_{sx} = q_s \frac{\vec{V}_{xmean}}{\left| \vec{V}_{xmean} \right|} \cos \phi \quad (5.15)$$

$$q_{sy} = q_s \frac{\vec{V}_{ymean}}{\left| \vec{V}_{ymean} \right|} \sin \phi \quad (5.16)$$

여기서,  $\phi$ 는  $q_s$ 와  $q_{sx}$ 가 이루는 각이다.

### 4.3 수치시뮬레이션의 결과

Fig. 5.16는 지형변동에 관한 수치시뮬레이션의 결과와 東江 등(1985)의 수리실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 먼저, Fig. 5.16(a)는 *Model-I*의  $T=1.0s$ ,  $H=10cm$ 인 원주구조물의 경우이다. 수치시뮬레이션의 결과와 수리실험결과와의 보정을 위하여 사용하는 무차원계수인  $A$ 의 값에 0.18을 적용하였다.

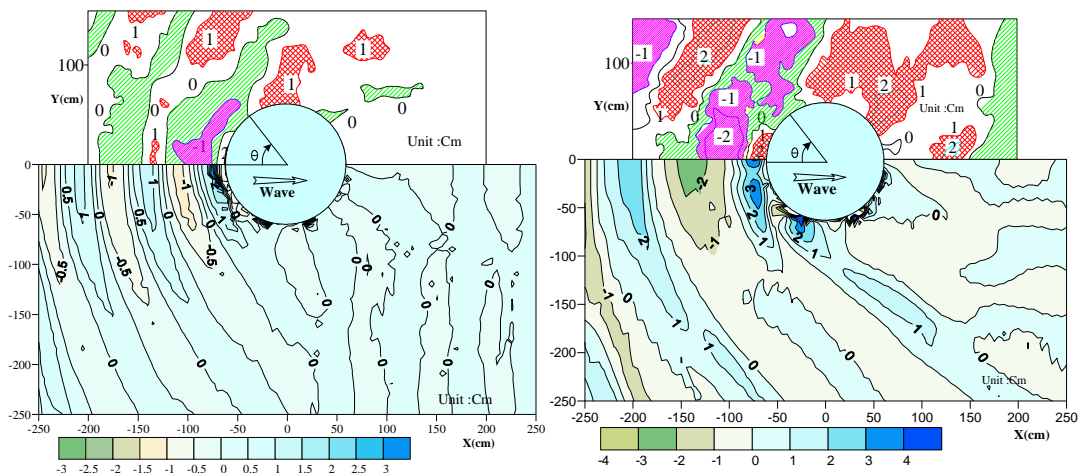
지형변동의 수치시뮬레이션결과와 수리실험결과를 비교하면 구조물의 전면에서는 실험결과와 약간의 차이가 발생하지만, 전체적으로 구조물의 전면  $\theta=0^\circ$ 에서  $-x$  방향으로 <퇴적>세굴<퇴적>세굴의 경향과 세굴과 퇴적이 발생하는 위치에 있어서도 수리실험결과와 잘 상응하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5.16(b)는 *Model-I*,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ 인 경우로, 무차원계수  $A=0.2$ 를 적용하여 수리실험결과와 비교한 것이다. 주기의 변화와 지형변동의 수치시뮬레이션에 대하여 勝井 등(1990)은 주기가 길어질수록 齊藤 등(1988)이 제안한 식에 의한 수치시뮬레이션결과와

불일치성이 커지는 것으로 언급하고 있다. 이러한 결과의 차이는 주기가 길어짐에 따라 제 2장에서 기술된 Goda(1983)의 비선형파라미터  $\Pi$ 가  $T=1.0s$ 인 경우는 0.114,  $T=1.5s$ 인 경우는 0.144로, 주기가 길어질수록 파동장에서 비선형성분이 더 크게 나타나기 때문이며, 또한 측면방향의 토사이동의 해석에 있어서 연직방향유속의 성분을 고려하여야 한다(東江 등, 1991)는 기존의 연구결과로부터 주기가 길어짐에 따라 연직방향의 유속성분의 영향이 더 커지기 때문에 지형변동의 수치시물레이션의 결과에서 불일치가 커지는 것으로 판단된다.

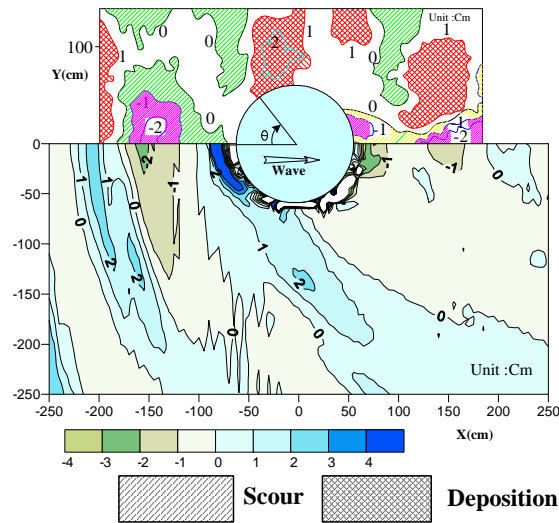
본 연구에서 적용한 해석법에 의해 산정된 비선형성분이 포함된 저면유속과 접목한 토사이동식으로 산정된 지형변동의 수치시물레이션결과는 구조물전면  $\theta=0^\circ$ 에서  $-x$ 축의 방향으로 세굴과 퇴적분포에 약간의 위상차가 발생하지만, 세굴과 퇴적의 정성적인 경향이 실험결과와 상응된다. 그러나, 연직주상구조물의 측면과 후면은 후술하는 토사이동식의 적용한계로 인하여 수치실험결과와 일치하지 않는 경향을 나타낸다.

Fig. 5.16(c)는 Model-II의  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ ,  $SH=16cm$ 의 경우로, 수중원주구조물에 의해 쇄파가 발생하는 경우에 있어서 수중구조물의 높이  $SH$ 가 15cm인 東江 등(1985)의 수치실험결과와 비교한 것으로,  $A=0.45$ 를 적용하였다.



(a) Model-I,  $T=1.0s$ ,  $H=10cm$

(b) Model-I,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$



(c) Model-II,  $T=1.5s$ ,  $H=10cm$ ,  $SH=16cm$  (submerged circular cylinder)

Fig. 5.16 Scour pattern around a circular cylinder.

수중연직주상구조물의 주변에서 지형변동의 수치시뮬레이션결과와 수리실험결과를 비교하면 수리실험결과에서 -1~2cm의 세굴이 발생하는 위치는  $x \approx -120 \sim -150cm$ 의 부근에서 -2cm의 세굴이, 구조물의 후면  $x \approx 80cm$ 에서 약 -1cm의 세굴이,  $x \approx -150 \sim -180cm$ 에서 -1~2cm의 세굴이 발생한다. 원주구조물과는 달리 수중원주구조물의 경우는 구조물의 상면으로 월파하는 파의 영향으로 구조물의 후면에 있어서 전면과 비슷한 크기의 세굴 심도가 나타나고 있으며, 지형변동의 수치시뮬레이션결과에서도 구조물의 전면과 후면에 세굴이 나타나고 있고, 세굴의 범위와 크기에 있어서도 수리실험결과와 잘 상응하고 있다. 퇴적이 나타나는 영역인  $x \approx -200cm$ 에서  $y \approx 0 \sim 150cm$  및 구조물의 측면인  $\theta = 90^\circ$ 의 방향으로  $y \approx 150cm$ 까지의 범위에서 수치시뮬레이션결과와 상응하고 있음을 알 수 있다.

구조물의 표면부근에 있어서 토사이동량이 과대 또는 과소(-5cm보다 크거나 5cm보다 작음)하게 나타나는 것으로 판단되는 부분은 공백으로 표시하였으며, 토사이동량이 과대 또는 과소로 나타나는 구조물의 표면부근은 주기가 길어지거나 쇄파하는 경우와 같이 비선형성의 영향이 가장 크게 나타나며, 이로 인하여 저면유속의 차이가 크게 발생된다. 토사이동식은 유속의 변화만으로 토사이동량을 산정하기 때문에 구조물의 표면에서 지형변동이 과대 또는 과소한 값이 나타나는 것으로 판단되며, 구조물의 전면에서 퇴적이

발생하는 수치해석결과와는 달리 퇴적이 발생하지 않는 이유는 수중원주구조물의 전면에서 부유된 토사가 연직방향의 유속성분에 의해 구조물의 측면 혹은 후면방향으로 이동하였을 가능성이 있으며, 지형변동의 수치시뮬레이션에서는 연직방향의 성분을 고려하지 못하기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 5.17은 등고선으로 표현된 Fig. 5.16(a)의  $T=1.0s$ , Fig. 5.16(b)의  $T=1.5s$ 인 경우를 3차원화하여 파랑에 의한 구조물주변의 지형변동특성을 나타낸 것이다.

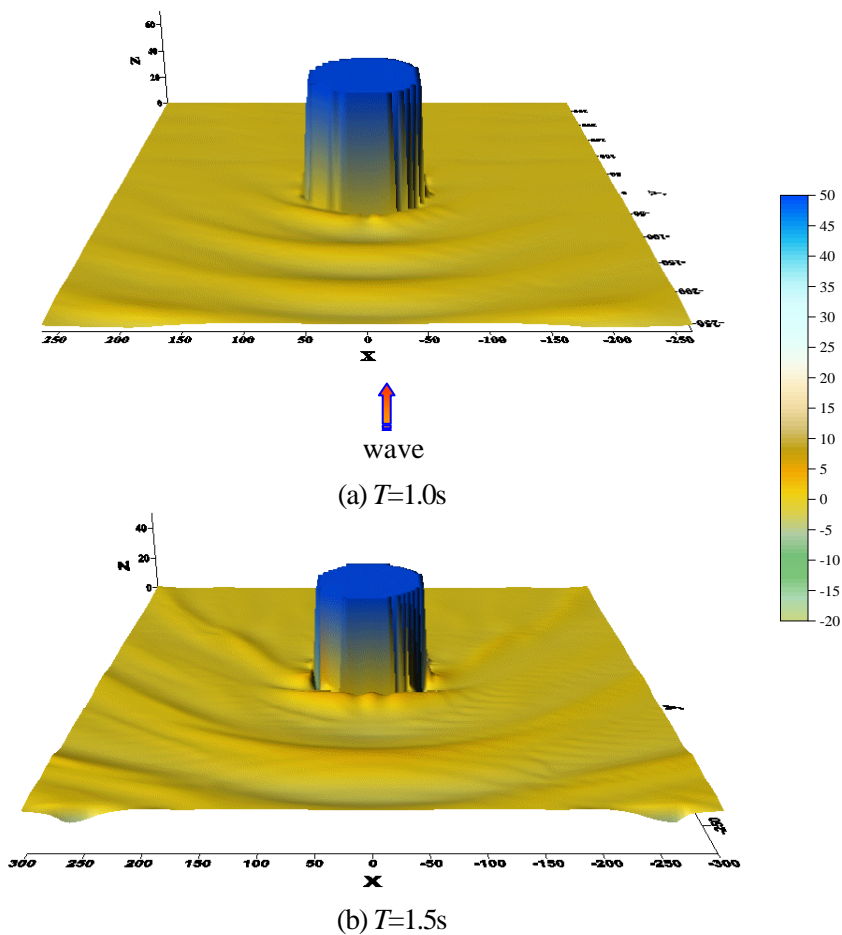


Fig. 5.17 Surface plot of seabed deformation by local scour  
(Model-I,  $H=10cm$ ).

#### 4.4 토사이동식의 한계성 및 적용성

토사이동식의 한계성은 齊藤 등(1988)의 연구에서 언급된 바와 같이 토사이동식에 있어서 Shield parameter  $\Psi_m$  을 결정하는 요소는 저면에 있어서 수립자의 진폭  $u_b$  로, 구조물의 회절산란과와 입사파랑과의 간섭현상으로 비선형성이 커지면 구조물의 주변에서 파동장은 매우 복잡하게 형성되기 때문에 저면의 있어서 수립자의 궤도는 원, 타원 또는 직선적인 변화 등 다양하고 3차원적인 형태를 나타낸다. 그러나, 수립자의 진폭을 1차원적으로 평가하여 Shield parameter를 산정하기 때문에 Shield parameter를 적용함에 한계가 있으며, 특히 구조물의 전면에 있어서는 중복파의 영향으로 파의 비선형성이 커지는 것과, 구조물의 전면에서 지형변동에 부유사의 영향에 크기 때문에 평균류의 수직방향흐름과 관련하여 고려할 필요가 있으며(東江 등, 1991), 부유된 토사의 이동거리는 토사의 침강속도와 평균류의 연직흐름과 관계가 있으므로 3차원적으로 해석되어야 한다. 따라서, 이러한 관점에서 구조물의 측면과 구조물의 표면에서 토사이동식의 적용은 한계가 있다.

본 연구의 결과가 연직방향의 평균류의 흐름을 고려하지 못하는 것, Shield parameter의 산정방법의 문제 및 토사이동식이 유속의 변화로 토사이동량을 산정하는 것 등으로 유속의 변화가 큰 구조물의 표면에서 토사이동량을 과대 또는 과소하게 평가할 수 있을 것으로 판단되지만, 기존 토사이동식에 본 해석법에서 산정된 저면유속을 접목함으로써 연직주상구조물뿐만 아니라 수중연직주상구조물에 의해 쇄파되는 경우에 있어서도 적용이 가능한 것으로 판단된다. 그리고, 지형변동의 수치시뮬레이션결과에서도 원주구조물의 전면에서 세굴·퇴적의 경향과 범위에 있어서 수리실험결과와 상응하는 점과, 수중 원주구조물에 의해 쇄파가 발생하는 경우에 있어서도 구조물의 주변에서 세굴·퇴적의 경향이 수리실험결과와 상응하는 점에서 본 해석결과의 타당성이 인정되며, 기존의 이론보다 적용성이 넓은 것으로 판단된다.

## 6. 결론

Full-nonlinear 해석법인 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF법을 적용하여 산정된 저면최대유속, 평균유속 및 파고분포를 (수중)연직주상구조물의 주변에서 지형변동(세굴·퇴적)의 특성과 연관하여 고찰하였다.

본 장에서의 해석법으로부터 산정된 저면유속과 齊藤 등(1988)이 제안한 토사이동식에 적용하여 기존의 연구방법으로는 해석하지 못하는 비선형성분의 영향과 구조물에 의해 파가 쇄파되는 경우 및 수중연직주상구조물에 대하여 지형변동의 수치시물레이션을 수행하고, 東江 등(1985)의 수리실험결과와 비교하였다. 본 장에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1)저면유속성분과 파고분포를 통하여 구조물의 주변에서 세굴·퇴적의 패턴과의 상호관계를 설명하였으며, 그 특성은 구조물의 전면에서  $-x$ 축의 방향으로 상대적으로 유속이 큰 영역에서는 세굴이, 작은 곳에서는 퇴적이 발생하며, 최대유속이 발생하는 곳에서 최대세굴이 나타난다.

(2)연직주상구조물의 전면에서 세굴·퇴적의 경향은 직립벽과 같은 형태의 경향을 나타내며, 본 연구에서는 중북과의 Node에서는 세굴이, Anti-node에서는 퇴적이 발생한다.

(3)3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF법을 접합한 수치해석법에 의해 산정된 저면유속과 齊藤 등(1988)이 제안한 토사이동식과 결합하여 연직주상구조물의 주변에서 세굴·퇴적의 경향을 해석함과 동시에 수리실험결과와 비교하였으며, 구조물의 전면에 있어서 세굴·퇴적 경향이 상응되는 것을 확인하였다.

(4)구조물에 의해 파가 쇄파하는 경우에 수중원주구조물에 의한 지형변동을 수치시물레이션하여 세굴의 특성과 퇴적의 경향을 해석하였으며, 구조물의 전후면에 있어서 수리실험결과와 세굴의 경향이 상응되었다.



## 〈참고문헌〉

- Katsui, H. and T. Toue (1988) : Inception of sand motion around a large obstacle, Proc, 21st ICCE, Vol. II, pp. 1310-1322.
- Kwang-Ho Lee (2006) : A Study on Time Domain Analysis of Nonlinear Dynamic Interaction among Waves, Currents and Bed Materials, the Doctoral Degree in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Nagoya University
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954) : Wave forces on piles ; a diffraction theory, Beach Erosion Board, Tech. Memo., 69, pp.1-17.
- Rance P.J. (1980) : The Potential for scour around large Object, Scour Prevention Techniques around Off-shore Structures, The Society for Underwater Technology, pp. 41-51.
- Sumer, B. M., Fredsøe, J. (2000) : Experimental study of 2D scour and its protection at rubble-mound breakwater, Coastal Engineering, Elsevier, Vol. 40, pp. 59-87.
- Sumer, B. M., Fredsøe, J. and Christiansen N. (1992a) : Scour around vertical piles in waves, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 118, pp.15-31
- Sumer, B. M., Christiansen N. and Fredsøe J. (1992b) : Time scale of scour around a vertical piles, Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. III, pp 308-315.
- Sumer, B. M., Christiansen N. and Fredsøe J. (1993) : Influence of cross section on wave scour around piles, J. of Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 99, pp.477-495

- ・ Soulsby, R. L. (1997) : Dynamics of Marine Sands. A Manual for Practical Applications. Thomas Telford, London, UK.
  
- ・ Swart, D. H. (1974) : Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Delft Hyd. Lab. Publ., No 131.
  
- ・ Van Rijn, L. C. (1984) : Sediment transport, part I: Bed load transport. J. Hyd. Eng. ASCE 110(10), 1431-1456
  
- ・ Xie, S. L. (1981) : Scouring patterns in front of vertical breakwater and their influence on the stability of the foundations of the breakwaters, Report, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, September, 61p
  
- ・ Xie, S. L. (1985) : Scouring patterns in front of vertical breakwaters, Acta Oceanologica Sinica, Vol. 4, pp. 153-164.
  
- ・ 渡辺 晃 (1981) : 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 海岸工学講演会論文集, 28, pp.285-289.
  
- ・ 渡辺 晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊 山勉 (1984) : 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 海岸工学講演会論文集, 31, pp.406-410.
  
- ・ 人江 功, 近藤隆道, 赤石正廣, 寺崎賢次 (1984) : 重複波による防波堤前面での海底洗掘-底質の移動機構に着目した研究- 海岸工学論文集, 31, pp.350-354.
  
- ・ 東江隆夫, 勝井秀博 (1985) : 大口徑圓柱周辺の洗掘現象, 海岸工学講演会論文集, 32, pp.425-429.

- ・ 齊藤栄一, 佐藤慎司, 柴山知也 (1988) : 波動場における大口径圓周辺の局所洗掘に関する研究, 海岸工學論文集, 35, pp.392-396.
- ・ 勝井秀博, 東江隆夫 (1990) : 大口径圓柱周辺の移動限界と洗掘, 海岸工學論文集, 37, pp.379-383.
- ・ 東江隆夫, 勝井秀博, 灘岡和夫 (1991) : 大口径圓柱周辺の砂の移動機構に関する研究, 海岸工學論文集, 38(1), pp.451-455.
- ・ 勝井秀博, 東江隆夫 (1992) : 大型海洋構造物周辺の洗掘深に関する定量評價, 海岸工學論文集, 39(1), pp.491-495.
- ・ 岩田好一郎, 金 昌濟, 安部智彦 (1993) : 二基の大口径圓筒構造物周辺の地形變化に関する研究, 海岸工學論文集, 40(1), pp.526-530.
- ・ 金昌濟 (1995) : 波による複數の大口径圓筒構造物基部周辺の局所洗掘に関する基礎的研究, 工學博士學位論文, 名古屋大學大学院.

---

## 6장 종합결론

---

본 연구에서는 대형연직주상구조물을 대상으로 하여 비쇄파시 및 쇄파후의 경우에 구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형을 해석하고, 더불어 쇄파시, 비쇄파시의 경우에 대하여 수중원주구조물을 포함하는 연직주상구조물의 주변에서 지형변동을 해석하였다.

먼저, 비쇄파시의 구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형의 해석법으로 Stokes의 2차파이론에 기초한 섭동전개법과 경계적분법(BIEM)을 병용하는 비선형주파수 영역해석법과 Full-nonlinear해석법으로 파랑과 구조물간의 비선형상호간섭에 의한 복잡한 자유수면의 특성을 고정도로 해석할 수 있는 3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 자유수면의 추적에 3차원 VOF(Volume Of Fluid)법을 적용하여 해석하였다.

쇄파후의 대형연직주상구조물에 작용하는 비선형파력 및 비선형파랑변형을 해석하기 위하여 동일한 Full-nonlinear해석법을 적용하였으며, 쇄파의 발생위치, 일정수심역의 수심, 입사파고, 구조물의 위치 등을 변화시켜 쇄파후 파랑에너지의 감쇠정도를 구조물에 작용하는 파력과 연관하여 검토하였다.

그리고, 본 연구의 해석법으로부터 산정되는 저면최대유속벡터, 평균유속벡터 및 파고분포와 같은 파동장의 특성과 원주구조물의 저면에서 발생하는 지형변동(세굴·퇴적)에 대해 기존의 수리실험결과와 연계하여 비쇄파 및 쇄파시에 구조물주변의 지형변동특성을 검토하고, 齊藤 등(1988)이 제안한 토사이동식과 본 해석법으로 산정되는 유속성분과 접합하여 쇄파시 및 비쇄파시의 경우에 지형변동에 관한 수치시뮬레이션을 수행하였고, 東江 등(1985)의 수리실험결과와 비교하였다.

이상의 과정으로부터 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 종합결론으로 하여 아래에 기술한다.

## 1. Stokes의 2차파 이론에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석

(1)임의단면의 연직주상구조물에 의한 비선형파랑변형과 비선형작용파력을 해석할 수 있는 수치해석법(경계적분법)을 제안하였고, 이로부터 정도 높은 해를 얻을 수 있었으며, 또한 본 이론의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2)파랑의 비선형성을 나타내는 비선형파라미터가 클수록 비선형성분은 크게 나타난다.

(3)구조물의 설치간격이 근접할수록 비선형성분의 영향은 커진다.

(4)복수연직주상구조물이 근접하게 설치될 경우 구조물간의 상호간섭으로 단수연직주상구조물의 경우보다 파력이 크게 작용하고,  $k^{(1)}a$ 의 변화에 따른 파력의 변화양상도 단수연직구조물의 경우와는 복잡한 변화양상을 나타낸다.

## 2. 비쇄파시 Full-nonlinear해석법에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석

(1)3차원파동장에 설치된 연직주상구조물과 파랑과의 비선형상호작용에 따른 연직주상구조물의 주변에서 파랑변형 및 구조물에 작용하는 파력의 특성을 수치계산결과 및 수리실험결과와 비교·검토하여 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2)Navier-Stokes방정식의 계산방법으로 본 연구에서 적용하는 수치해석기법인 Two-step projection법은 기존의 HSMAC기법과 비교하여 매우 효율적인 방법으로 판단된다.

(3)본 연구에서 검토한 원형단면 및 정사각형단면을 갖는 연직주상구조물에 있어서 구조물의 전면에서는 부분중복과의 영향으로 높은 수면상승고를, 구조물의 배후면에서는 상대적으로 낮은 수면상승고를 나타냈다. 또한, 구조물의 전면과 배후면에서 수면상승고의 시간변화에는 위상차이를 보이며, 특히 구조물의 배후면에서 수면상승고에 대한 시간변화는 구조물간의 간섭현상 및 회절산란파의 영향으로 비선형성이 크게 나타났다.

(4)복수연직주상구조물의 배치간격의 변화에 따른 구조물의 표면둘레에서 최대수면상승고는 구조물에 의한 회절산란파의 영향과 구조물간의 비선형간섭으로 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

(5)구조물의 배치간격에 따른 복수연직주상구조물에 작용하는 각 성분파력의 변화는 구조물의 배치간격이 일정거리 이상으로 되면 단수연직주상구조물의 각 성분파력에 근접하게 되는 것을 알 수 있었다.

(6)연직주상구조물을 실효역에 설치할 경우에 파랑조건에 따라 구조물의 배치간격을 적절히 조절함으로써 작용파력 및 주변파동장을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

### **3. 쇄파후 Full-nonlinear해석법에 의한 비선형파력 및 비선형파랑변형의 해석**

(1)구조물의 유무에 따라 쇄파파형에서 변화가 발생하며, 일정수심영역의 수심이 클수록 구조물에 의한 반사파의 영향으로 쇄파파형의 변화도 크게 나타난다.

(2)경사면상에서 쇄파가 발생하면 일정수심역에 위치한 구조물에 작용하는 비선형파력의 감소기울기가 사면분기점후에 쇄파가 발생하는 경우보다 크다. 따라서, 일부 영역에서는 파고가 증가하여도 구조물에 작용하는 파력이 작게 나타난다.

(3)쇄파의 발생위치에 따른 파력변화의 특성은 일정수심역의 수심을 변화시키면서 고찰하였고, (2)와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

(4)쇄파지점에 구조물이 근접할수록 파력의 변화기울기는 급격하게 증가하고, 멀어짐에 따라 파력의 변화기울기가 완만해진다.

#### 4. 구조물 주변에서의 흐름과 지형변동의 해석

(1)저면유속성분과 파고분포를 통하여 구조물의 주변에서 세굴·퇴적의 패턴과의 상호관계를 설명하였으며, 그 특성은 구조물의 전면에서  $-x$ 축의 방향으로 상대적으로 유속이 큰 영역에서는 세굴이, 작은 곳에서는 퇴적이 발생하며, 최대유속이 발생하는 곳에서 최대세굴이 나타난다.

(2)연직주상구조물의 전면에서 세굴·퇴적의 경향은 직립벽과 같은 형태의 경향을 나타내며, 본 연구에서는 중복파의 Node에서는 세굴이, Anti-node에서는 퇴적이 발생한다.

(3)3차원 Navier-Stokes의 운동방정식과 3차원 VOF법을 적합한 수치해석법에 의해 산정된 저면유속과 齊藤 등(1988)이 제안한 토사이동식과 결합하여 연직주상구조물의 주변에서 세굴·퇴적의 경향을 해석함과 동시에 수리실험결과와 비교하였으며, 구조물의 전면에 있어서 세굴·퇴적 경향이 상응되는 것을 확인하였다.

(4)구조물에 의해 파가 쇄파하는 경우에 수중원주구조물에 의한 지형변동을 수치시물레이션하여 세굴의 특성과 퇴적의 경향을 해석하였으며, 구조물의 전후면에 있어서 수리실험결과와 세굴의 경향이 상응되었다.

회절파의 영향을 고려하여야 하는 대형주상구조물에 있어서 쇄파시, 비쇄파시에 있어서 구조물에 작용하는 비선형파력, 비선형파랑변형특성과 파랑에 의해 발생하는 구조물의 주변에서 세굴·퇴적경향을 해석하여 상기와 같은 결론을 얻을 수 있었으며, 이와 같은 결론을 토대로 해안 및 해양구조물의 설계와 시공에 있어서 보다 정도 높은 파랑의 영향을 해석을 할 수 있을 것으로 판단된다. 세부적으로 Onshore와 Offshore에 설치되는 대형구조물에 대한 파랑의 영향을 정도 높게 해석함으로서 세굴을 방지하기 위한 기초 설계에서부터 구조물과의 상호영향에 의한 파력과 파랑변형특성을 고려함으로서 적절한 배치간격을 조절하여 작업가능성을 높이고, 구조물의 단면을 최소화하는 효율적인 설계가 가능하다고 판단된다. 뿐만 아니라, 연안역에 설치되는 구조물에 있어서 쇄파의 영향을 고려하여 사면의 경사와 구조물의 위치를 합리적으로 결정할 수 있으므로 대형구조물의 설계와 시공에 있어서 파랑의 특성을 파악하는 방법으로 활용도가 클 것으로 판단된다.